

MOLDE MULTIPROPÓSITOS PARA INYECCIÓN DE PROBETAS  
TERMOPLÁSTICAS SEGÚN NORMAS ASTM D-256, D-638 TIPO 1, D-790 Y D-  
5420.

JOSÉ DANILO CAMPOS GARCÍA

UNIVERSIDAD ECCI  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTÁ D.C.  
2016

MOLDE MULTIPROPÓSITOS PARA INYECCIÓN DE PROBETAS  
TERMOPLÁSTICAS SEGÚN NORMAS ASTM D-256, D-638 TIPO 1, D-790 Y D-  
5420.

José Danilo Campos García

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director  
Daniel Eduardo Villalobos Correa

Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD ECCI  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTÁ D.C  
2016

Nota de Aceptación.

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma de jurado

---

Firma del jurado

Bogotá. D.C. 8 de Julio de 2016

A todas aquellas personas que por su experiencia y calidez comparten momentos y conocimientos para el desarrollo de este proyecto.

A quienes con su práctica fueron participes en la elaboración y desarrollo de los componentes del molde.

A esas personas que se involucraron e invirtieron tiempo y conocimiento para que el molde fuera una realidad.

A todos ellos muchas gracias.

## AGRADECIMIENTOS

A todos los involucrados en este proyecto, mencionando especialmente al director del mismo, Ingeniero Daniel Eduardo Villalobos Correa, al Ingeniero Hernán Castillo quien fue participe en la intervención de las facilidades para el préstamo de la máquina de inyección. Al ingeniero Horacio Fonseca quien por su colaboración en cuanto a los préstamos y capacitaciones con respecto al centro de mecanizado Leadwell V30 de la Universidad.

A los directivos de la Universidad ECCEI, que por su gestión fue posible el uso de las herramientas disponibles y necesarias para la fabricación del molde en su totalidad y fue posible realizar las pruebas de funcionamiento y verificación en los laboratorios de la institución.

## TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	5
TABLA DE CONTENIDO .....	6
LISTA DE TABLAS .....	13
LISTADO DE FIGURAS.....	14
Resumen .....	18
Abstract.....	19
INTRODUCCIÓN .....	20
CAPÍTULO 1. JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS, ANTECEDENTES Y ALCANCE...	21
1.1 JUSTIFICACIÓN .....	21
1.2 OBJETIVO GENERAL .....	21
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	22
1.4 ANTECEDENTE DEL PROYECTO.....	22
1.5 ALCANCE DEL PROYECTO .....	22
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO .....	24
2.1 DEFINICIÓN DE POLÍMEROS .....	24
2.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS PLÁSTICOS. ....	24
2.3 NATURALEZA Y ESTRUCTURA DE LOS POLÍMEROS.....	25
2.4 CLASIFICACIÓN DE POLÍMEROS.....	25
2.5 ESTRUCTURA MOLECULAR.....	28
2.6 CARACTERÍSTICAS DE LOS POLÍMEROS .....	30
2.6.1 Reología. ....	30
2.6.2 Reología rotacional. ....	31
2.6.3 Índice de fluidez del material .....	32
2.7 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS POLÍMEROS.....	33
2.7.1 Tensión. ....	34
2.7.2 Flexión. ....	34

2.7.3 Impacto.....	34
2.7.4 Compresión. ....	35
2.8 TRANSFORMACIÓN DE POLÍMEROS.....	35
2.9 CICLO DE INYECCIÓN DE PLÁSTICOS.....	36
2.10 NORMATIVIDAD.....	37
2.10.1 Norma ASTM D-256 (Prueba de impacto Izod). ....	37
2.10.2 Norma ASTM D-638 tipo 1 (Prueba de tensión). ....	40
2.10.3 Norma ASTM D-790 (Prueba de flexión .....)	41
2.10.4 Norma ASTM D-5420 (Prueba de impacto Gardner). ....	42
2.11 POLIMEROS DE INYECCION .....	44
2.11.1 Polipropileno (PP).....	44
2.11.2 Poliestireno (PS).....	44
2.11.3 Polietileno de alta densidad (HDPE).....	44
2.11.4 Polietileno de baja densidad (LDPE). ....	45
2.11.5 Poliamida 66 Nylon 66 (PA66).....	45
2.12 MATERIALES DE FABRICACIÓN DE MOLDES DE INYECCIÓN. ....	45
2.12.1 Aceros para herramientas.....	45
2.12.2 Propiedades de los aceros para herramientas. ....	46
2.12.3 Acero para de contacto (metal-metal). Acero SAE 4140 .....	47
2.12.4 Acero para contacto con material fundido. Acero SAE P-20.....	48
2.12.5 Acero para contorno. Acero SAE 1045 .....	48
2.13 PROCESO DE MANUFACTURA DE MOLDES.....	49
CAPÍTULO 3 DISEÑO METODOLÓGICO.....	52
3.1 DIAGRAMA DE DISEÑO METODOLOGICO .....	52
CAPÍTULO 4. HERRAMIENTAS ESPECÍFICAS.....	62
4.1 SOFTWARE CAD AUTODESK INVENTOR 2011.[16].....	63
4.2. SOFTWARE CAE (AUTODESK MOLD FLOW ADVISER 2010.....	64
4.3 SOFTWARE CAM (MASTERCAMX2).....	66

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	68
5.1 DISEÑO PRELIMINAR. “FASE N°1” .....	68
5.1.1 Requerimientos del cliente.....	68
5.2 SELECCIÓN DE LAS NORMAS Y SUS ESPECÍMENES.....	70
5.3 MODELADO DE ESPÉCIMEN.....	70
5.3.1 Modelado de espécimen norma ASTM D-256. ....	71
5.3.2 Modelado de espécimen norma ASTM D-638 tipo 1 .....	72
5.3.3 Modelado de espécimen norma ASTM D-790 .....	73
5.3.4 Modelado de espécimen norma ASTM D-5420 .....	74
5.4 CÁLCULO DE CANTIDAD DE CAVIDADES DEL MOLDE.....	75
5.4.1 Cálculo cantidad cavidades en base al espécimen de mayor volumen .	75
5.4.1.1 Cálculo debido a la fuerza de cierre de la máquina.....	75
5.4.1.1.1 Cálculo fuerza de cierre espécimen ATSM D-256 .....	76
5.4.1.1.2 Cálculo fuerza de cierre especímenes ASTM D-638 T1 .....	77
5.4.1.1.3 Cálculo fuerza de cierre espécimen ASTM D-790 .....	77
5.4.1.1.4 Cálculo fuerza de cierre especímenes ASTM D-5420 .....	77
5.4.1.2 Cálculo debido volumen máximo de inyección.....	77
5.4.1.2.1 Cálculo volumen máximo de inyección espécimen ASTM D-256 .....	78
5.4.1.2.2 Cálculo volumen máximo de inyección espécimen ASTM D-638 T1 .....	78
5.4.1.2.3 Cálculo volumen máximo de inyección espécimen ASTM D-790 .....	79
5.4.1.2.4 Cálculo volumen máximo de inyección espécimen ASTM D-5420.....	79
5.5 PARÁMETROS DE SELECCIÓN CANTIDAD CAVIDADES DEL MOLDE ..	79
5.5.1 Balanceo volumétrico.....	79
5.5.2 Cantidad de cavidades por placa.....	79
5.6 SELECCIÓN DE LOS MATERIALES POLÍMEROS DE INYECCIÓN .....	81



5.7 DISEÑO BÁSICO DEL MOLDE .....	82
5.8 CÁLCULOS DE COMPONENTES MECÁNICOS DEL MOLDE .....	83
5.8.1 Cálculo de espesor de pared de placa de insertos .....	83
5.8.1.1 Cálculo espesor de pared espécimen ASTM D-256.....	84
5.8.1.2 Cálculo espesor de pared espécimen ASTM D-638 tipo 1 .....	84
5.8.1.1 Cálculo espesor de pared espécimen ASTM D-256.....	85
5.8.1.1 Cálculo espesor de pared espécimen ASTM D-256.....	85
5.8.2 Selección de diámetros de bebedor de molde .....	86
5.8.3 Selección de diámetro de canales de alimentación primarios y secundarios. ....	89
5.8.4 Selección de punto de inyección .....	90
5.8.5 Evacuación de aire .....	91
5.8.6 Canales de Refrigeración .....	91
5.9 MODELADO Y PLANOS DE PLACAS DE INSERTOS.....	92
5.10 ANÁLISIS MECÁNICO DEL MOLDE POR ELEMENTOS FINITOS.....	99
5.10.1 Análisis mecánico del molde (fuerza de cierre <b>45 toneladas</b> ).....	101
5.10.1.1 Resultado de análisis de esfuerzo de Von Mises (fuerza de cierre 45 toneladas). ....	101
5.10.1.2 Resultado de desplazamiento (fuerza de cierre 45 toneladas). ..	102
5.10.1.3 Resultado presión de contacto (fuerza de cierre 45 toneladas). .	103
5.10.2 Análisis Mecánico del molde (fuerza de cierre <b>4,5 toneladas</b> ).....	104
5.10.2.1 Resultado esfuerzo Von Mises con (fuerza de cierre de 4,5 toneladas).....	105
5.10.2.2 Resultado desplazamiento (fuerza de cierre 4,5 toneladas). .....	105
5.10.2.3 Resultado presión de contacto (fuerza de cierre 4,5 toneladas). .	106
5.11 MODELADO DE LAS PLACAS COMPONENTES DEL MOLDE. ....	107
5.12 DISEÑO FINAL SIMULACIÓN EN SOFTWARE MOLDFLOW ADVISER	111
5.12.1 Cálculos de inyección .....	111
5.12.1.1 Calculo capacidad de inyección .....	111

5.12.1.2	Calculo tiempo de inyección.....	112
5.12.1.3	Calculo de tiempo de solidificación .....	112
5.13	ANÁLISIS CAE SOFTWARE MOLD FLOW ADVISER. ESPÉCIMEN ASTM D-638 TIPO 1 .....	114
5.13.1	Análisis de pieza individual. ....	114
5.13.1.1	Geometría espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Geometry).....	114
5.13.1.2	Complejidad del modelo espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Model complexity). ....	115
5.13.1.3	Idoneidad del modelo espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Model suitability) .....	116
5.13.1.4	Posición de entrada espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Gate location).....	116
5.13.1.5	Indicador de resistencia de flujo espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Flow resistance indicator). ....	117
5.13.1.6	Idoneidad de las entradas espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Gating suitability). ....	117
5.13.1.7	Punto de inyección espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Best gate location).....	118
5.13.2	Llenado molde multi-cavidades dos (2) piezas espécimen ASTM D-638 t 1.....	119
5.13.2.1	Tiempo de llenado espécimen ASTM D-638 tipo 1. (fill time).....	120
5.13.2.2	Flujo del plástico espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Plastic Flow..	121
5.13.2.3	Confianza de llenado espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Confidence of fill).....	123
5.13.2.4	Predicción de la calidad espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Quality prediction). ....	123
5.13.2.6	Temperatura en el frente del flujo espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Temperature at Flow front).....	125
5.13.2.7	Orientación de la superficie espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Orientation at skin).....	125

5.13.2.8 Temperatura media espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Average Temperature). .....	127
5.13.2.9 Fracción en la capa solidificada al final del llenado espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Frozen layer fraction at end of fill).....	128
5.13.2.10 Atrapamiento de aire espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Air Traps). .....	129
5.13.3 Compactado molde multi-cavidades dos (2) piezas espécimen ASTM D-638 t 1 .....	130
5.13.3.1 Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Time to reach ejection Temperature).....	130
5.13.3.2 Contracción volumétrica en la inyección espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Volumetric shrinkage at ejection). .....	131
5.13.4 Ventana de proceso espécimen ASTM D-638 tipo 1. ....	131
5.13.5 Tabla de valores relevantes para el ciclo de inyección. ....	132
5.14 ESPECIFICACIONES DE FABRICACIÓN PLANOS CONSTRUCCIÓN .	134
5.15 FABRICACIÓN DEL MOLDE (DISEÑO FINAL. “FASE N°3”) .....	136
5.15.1 Obtención de los materiales. ....	136
5.16 SIMULACIÓN MECANIZADO CNC SOFTWARE MASTER CAM X2 .....	137
5.16.1 Parámetros para la simulación del mecanizado. ....	139
5.17 CÁLCULOS DE PARÁMETROS DE CORTE.....	141
5.18.1 Parámetros de corte (taladrado .....	141
5.18.2 Parámetros de corte (fresado). ....	141
5.18.3 Parámetros de corte escariador punta redonda.....	143
5.18 SIMULACIÓN DE OPERACIONES DE MECANIZADO. ....	143
5.19 HOJA DE PROCESO .....	152
5.20 TRATAMIENTO TÉRMICO, TEMPLE Y REVENIDO .....	157
5.21 ACABADO SUPERFICIAL DE LAS CAVIDADES DEL MOLDE .....	158
5.22 PUESTA A PUNTO DEL MOLDE .....	158
5.23 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y RESULTADOS .....	158

5.23.1 Resultado final de inyección espécimen ASTM D-638 tipo 1 material polímero polipropileno. ....	159
5.23.2 Resultado final de inyección espécimen ASTM D-638 tipo 1, material polímero polietileno de baja densidad. ....	161
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES .....	163
BIBLIOGRAFÍA .....	167

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los polímeros .....	24
Tabla 2. Ficha técnica máquina de inyección “PLASTIJET EUROMAP 110/45” ...	69
Tabla 3. Valor área proyectada de los especímenes de las normas.....	76
Tabla 4. Resultado cantidad de especímenes por cálculo de fuerza de cierre. ....	77
Tabla 5. Volumen proyectado de los especímenes de las normas .....	78
Tabla 6. Resultado calculo especímenes volumen máximo de inyección.....	79
Tabla 7. Cantidad de cavidades por placa de espécimen.....	80
Tabla 8. Longitudes de especímenes .....	84
Tabla 9. Resultado espesor de pared de placa de insertos .....	85
Tabla 10. Cálculo peso especímenes .....	88
Tabla 11. Valores de fabricación de punto de inyección rectangular .....	91
Tabla 12. Valores relevantes de inyección espécimen D-638 tipo 1 .....	133
Tabla 13. Tabla de selección de herramientas .....	138
Tabla 14. Parámetros de velocidad de corte de herramientas.....	140
Tabla 15. Cálculo velocidad de corte broca .....	141
Tabla 16. Cálculo velocidad de corte fresado CNC Desbaste .....	142
Tabla 17. Cálculo velocidad de corte Fresado Acabado.....	142
Tabla 18. Cálculo de mecanizado de desbaste y acabado herramienta punta redonda.....	143
Tabla 19. Valores medidos de placas de insertos sin tratamiento térmico .....	157
Tabla 20. Resultados espécimen ASTM D-638 T1. Polipropileno .....	159
Tabla 21. Resultados espécimen ASTM D-638 T1. Polietileno de baja densidad	161

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de polímeros [3] .....	26
Figura 2. Ilustración Reología [6] .....	31
Figura 3. Ilustración viscosímetro rotacional.[8] .....	32
Figura 4. Índice de fluidez .....	33
Figura 5. Clasificación procesos de transformación polímeros .....	35
Figura 6. Ciclo de inyección [11] .....	36
Figura 7. Máquina de martillo para prueba impacto Izod. [12] .....	38
Figura 8. Máquina de prueba Tensión.[13] .....	40
Figura 9. Máquina de prueba Flexión [14] .....	41
Figura 10. Máquina de prueba impacto Gardner.[15] .....	43
Figura 11. Mapa conceptual materiales para fabricación de moldes .....	49
Figura 12. Proceso de manufactura de moldes .....	50
Figura 13. Matriz de implementación de tesis .....	52
Figura 14. Matriz fase 1. Sección 1 .....	54
Figura 15. Matriz fase 1. Sección 2 .....	55
Figura 16. Matriz fase 2 .....	57
Figura 17. Matriz fase 3. Sección 1 .....	58
Figura 18. Matriz fase 3. Sección 2 .....	60
Figura 19. Matriz Fase 3. Sección 3 .....	61
Figura 20. Matriz fase 4 .....	62
Figura 21. Matriz Fase 5 .....	62
Figura 22. Entorno grafico Autodesk Inventor 2011 .....	64
Figura 23. Entorno grafico Autodesk Moldflow Adviser 2010 [16] .....	65
Figura 24. Imagen de resultados Autodesk Moldflow Adviser 2010 .....	65
Figura 25. Entorno grafico Master Cam X2 [16] .....	66
Figura 26. Centro de mecanizado Leadwell V30 Universidad ECCI .....	67
Figura 27. Modelo de espécimen de la norma ASTM D-256 .....	71
Figura 28. Modelo de espécimen de la norma ASTM D-638 tipo 1 .....	72
Figura 29. Modelo de espécimen de la norma ASTM D-790 .....	73
Figura 30. Modelo de espécimen de la norma ASTM D-5420 .....	74
Figura 31. Volumen de especímenes .....	75
Figura 32. Imagen de producción de polímeros en el mundo [18] .....	81
Figura 33. Espesor de pared del molde .....	86
Figura 34. Diagrama para determinar la amplitud del diámetro del bebedero [21] .....	87

Figura 35. Detalle de selección de diagrama selección bebedero .....	87
Figura 36. Diseño final de bebedero de molde .....	88
Figura 37. Secciones transversales de canales de distribución [17].....	89
Figura 38. Diagrama de selección de diámetro de canales de distribución [17] ....	90
Figura 39. Punto de inyección.....	91
Figura 40. Modelo placa de insertos espécimen D-256 .....	93
Figura 41. Modelo placa de insertos espécimen D-638 tipo 1 .....	93
Figura 42. Modelo placa de insertos espécimen D-790 .....	94
Figura 43. Modelo placa de insertos espécimen D-5420 .....	94
Figura 44. Modelo aplicación de fuerza de cierre 45 toneladas. ....	100
Figura 45. Resultado Esfuerzo Von Mises (fuerza de cierre 45 toneladas) .....	101
Figura 46. Resultado desplazamiento (fuerza de cierre 45 toneladas) .....	102
Figura 47. Resultado presión de contacto (fuerza de cierre 45 toneladas) .....	103
Figura 48. Modelo aplicación de fuerza de cierres 4,5 toneladas .....	104
Figura 49. Resultado Esfuerzo Von Mises (fuerza de cierre 4.5 toneladas). ....	105
Figura 50. Resultado desplazamiento (fuerza de cierre 4.5 toneladas). ....	106
Figura 51. Resultado presión de contacto (fuerza de cierre 4.5 toneladas) .....	107
Figura 52. Modelo general del molde.....	107
Figura 53. Modelo placa fija del molde .....	108
Figura 54. Modelo placa de expulsión. ....	108
Figura 55. Modelo placa móvil espécimen D-256 .....	109
Figura 56. Modelo móvil placa espécimen D-638 tipo 1 .....	109
Figura 57. Modelo placa móvil espécimen D-790 .....	110
Figura 58. Modelo placa móvil espécimen D-5420 .....	110
Figura 59. Difusividad térmica polímeros amorfos [22] .....	113
Figura 60. Difusividad térmica polímeros semi cristalinos [22] .....	113
Figura 61. Temperatura de desmoldeo de polímeros [19] .....	114
Figura 62. Geometría. Complejidad del molde espécimen ASTM D-638 tipo 1 ...	115
Figura 63. Idoneidad del modelo (PP ASTM D-638 T1).....	116
Figura 64. Resistencia de flujo (PP ASTM D-638 T1).....	117
Figura 65. Idoneidad de entrada (PP ASTM D-638 T1) .....	118
Figura 66. Punto de inyección (PP ASTM D-638 T1).....	119
Figura 67. Distribución de sistema de llenado de molde.....	120
Figura 68. Tiempo de llenado (PP ASTM D-638 T1) .....	121
Figura 69. Entrada del polímero fundido .....	122
Figura 70. Llenado de canales primarios y secundarios del molde.....	122
Figura 71. Paso el polímero fundido por el punto de inyección .....	122

Figura 72. Desplazamiento del polímero fundido dentro de la cavidad.....	122
Figura 73. Desplazamiento requerido para adoptar la forma de la cavidad .....	122
Figura 74. Cavidad llena totalmente por el polímero fundido.....	122
Figura 75. Confianza de llenado (PP ASTM D-638 T1) .....	123
Figura 76. Predicción calidad (PP ASTM D-638 T1).....	124
Figura 77. Presión final llenado (PP ASTM D-638 T1).....	124
Figura 78. Temperatura frente flujo (PP ASTM D-638 T1).....	125
Figura 79. Orientación de superficie (PP ASTM D-638 T1) .....	126
Figura 80. Detalle orientación de superficie ASTM D-638 T1 .....	126
Figura 81. Temperatura media (PP ASTM D-638 T1).....	127
Figura 82. Capa solidificada (PP ASTM D-638 T1).....	128
Figura 83. Atrapamiento de aire (PP ASTM D-638 T1).....	129
Figura 84. Detalle de salida de aire placa ASTM D-638 T1 .....	129
Figura 85. Tiempo temperatura expulsión (PP ASTM D-638 T1).....	130
Figura 86. Contracción volumétrica (PP ASTM D-638 T1) .....	131
Figura 87. Ventana de proceso (PP ASTM D-638 T1).....	132
Figura 88. Entorno Master CamX2 importación de modelo .....	144
Figura 89. Entorno Master Cam X2 selección de maquina.....	145
Figura 90. Entorno Master Cam X2 selección de material.....	145
Figura 91. Entorno Master Cam X2 ubicación centro pieza.....	146
Figura 92. Entorno Master Cam X2 selección de operación de mecanizado.....	147
Figura 93. Entorno Master Cam X2 selección herramienta de mecanizado. ....	147
Figura 94. Entorno Master Cam X2 condiciones de trabajo de la herramienta ....	148
Figura 95. Entorno Master Cam X2 simulación de operación de mecanizado.....	149
Figura 96. Entorno Master Cam X2 generación de programa de mecanizado ....	149
Figura 97. Entorno Master Cam X2 simulación de planeado.....	150
Figura 98. Entorno Master Cam X2 Taladrados.....	151
Figura 99. Entorno Master Cam X2 fresado .....	151
Figura 100. Resultados espécimen ASTM D-638 T1. Polipropileno .....	159
Figura 101. Especímenes ASTM D-638 tipo 1 polipropileno .....	160
Figura 102. Resultados espécimen ASTM D-638 T1. Polietileno de baja densidad .....	161
Figura 103. Especímenes ASTM D-638 tipo 1 polietileno de baja densidad .....	162



## LISTADO DE ANEXOS

Anexo A. Fichas técnicas de materiales polímeros

Anexo B. Planos de fabricación del molde

Anexo C. Tablas de calibración inicial de máquina especímenes ASTM D-256,  
ASTM D-790 Y ASTM D-5420

Anexo D. Fichas técnicas materiales de construcción de moldes.

## RESUMEN

Este proyecto consistió en el cálculo, diseño y fabricación de un molde multipropósitos para la inyección de probetas termoplásticas según las normas ASTM D-256 norma de impacto Izod, ASTM D-638 tipo 1 norma de tensión, ASTM D-790 norma de flexión y ASTM D-5420 norma de impacto Garnerd. El cálculo se realizó con los cuatro (4) especímenes de las normas mencionadas anteriormente y con cinco (5) polímeros termoplásticos que son, el polipropileno (PP), el poliestireno (PS), el polietileno de baja densidad (LDPE), el polietileno de alta densidad (HDPE) y la poliamida 66 o Nylon 66 (PA66). Este proyecto se realiza con el fin de suplir la necesidad de una herramienta específica para la obtención de las probetas termoplásticas de los especímenes de las normas mencionadas.

Para realizar este proyecto fue necesario el uso de herramientas CAD, CAM y CAE, con el fin de optimizar los procesos inherentes del desarrollo del proyecto en cada una de las fases. Con la herramienta CAD, se realizaron los modelos y planos de los especímenes de cada norma y de todos los componentes del molde, ajustando las dimensiones de los especímenes de acuerdo con los cálculos y las simulaciones obtenidas durante el proceso. Con la herramienta CAE se realizaron las simulaciones del proceso de inyección de cada espécimen con cada material polímero, esta simulación arroja como resultado los parámetros iniciales para el ciclo de inyección del molde. Con la herramienta CAM se realizaron los procesos de fabricación del molde, generando códigos de programación entre el centro de mecanizado CNC y los modelos digitales realizados con el software CAD, este proceso se realiza buscando gran precisión dimensional de los componentes a mecanizar, teniendo una agilidad básica en cuanto al proceso de transformación de acero por arranque de viruta se refiere.

Una vez fabricado del molde, respecto al cálculo y el diseño final, se proceden a realizar pruebas de inyección para determinar la finalidad del molde y la obtención de las probetas se acuerdo con cada espécimen y cada material polímero seleccionado, para lo cual se realizaron las pruebas a él espécimen de la norma ASTM D-638 tipo 1, con los polímeros polipropileno (PP) y polietileno de baja densidad (LDPE).

Palabras claves:

Inyección; polímeros; moldes

## **ABSTRACT**

This project consisted of the calculation, design and manufacture of a multi-purpose mold for injection of thermoplastic specimens according to ASTM D-256 standard Izod impact ASTM D-638 Type 1 standard voltage, ASTM D-790 standard bending and ASTM D-5420 standard Garnerd impact. The calculation was performed with the four (4) specimens of the above standards and five (5) thermoplastic polymers are polypropylene (PP), polystyrene (PS), the low density polyethylene (LDPE), polyethylene high density polyethylene (HDPE) and polyamide 66 or Nylon 66 (PA66). This project is carried out in order to meet the need for a specific tool for obtaining thermoplastic specimens of specimens of these standards.

To carry out this project required the use of tools CAD, CAM and CAE, in order to optimize the inherent processes of project development in each of the phases. With the CAD tool, models and drawings of specimens of each standard and all mold components, adjusting the dimensions of the specimens in accordance with the calculations and simulations obtained during the process were conducted. With the tool CAE simulations of the injection process of each specimen with each polymer material is made, this simulation indicates the result of the initial parameters for the injection cycle of the mold. With the CAM tool manufacturing processes mold were conducted, generating programming codes between CNC machining center and digital models made with CAD software, this process is done searching high dimensional accuracy of the components to be machined, with an agility Basic as the steel transformation process by chip removal is concerned.

Once manufactured mold, regarding the calculation and the final design will proceed to perform injection tests to determine the purpose of the mold and obtaining the specimens was according to each specimen and each selected polymer material for which they were made the test specimen to ASTM D-638 type 1 standard, with polyethylene polymers polypropylene (PP) and low density (LDPE).

Keywords:

Injection; polymers; molds.

## INTRODUCCIÓN

La presente monografía es para optar al grado de Ingeniero Mecánico. Es un proyecto aplicado a la industria de polímeros, donde se aplicarán las temáticas de polímeros, inyección de polímeros, modelado CAD, cálculos mecánicos, simulación con elementos finitos, simulación con software CAE, interfaces en software CAM. Para realizar el cálculo, diseño y fabricación de un molde multipropósitos para la obtención de los especímenes de las normas ASTM D-256, ASTM D-638 tipo 1, ASTM D-790 Y ASTM D-5420.

Los ensayos de materiales son de gran importancia a nivel industrial, ya que son la corroboración de las propiedades con las que son obtenidos los materiales, los diferentes ensayos garantizan la viabilidad de los materiales y establecen los parámetros de aceptación de los mismos.

Con el fin de obtener probetas estandarizadas de las normas mencionadas, se trabaja en el cálculo, diseño y fabricación de un molde multipropósitos. La Universidad ECCI por lo cual no cuenta con una herramienta molde para la obtención de estas probetas, el objetivo de fabricar el molde para brindar un servicio a la comunidad universitaria y puedan obtener probetas con los estándares de las normas mencionadas. Debido a la cantidad de polímeros que se encuentran en el mercado se trabajan en este proyecto con cinco (5) materiales tales como Polipropileno (PP), Poliestireno (PS), Polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno de alta densidad (HDPE) y poliamida 66 o Nylon 66 (PA66), debido a que tiene una alta aplicabilidad industrial.

En consecuencia, se fabricará un molde multipropósitos, el cual contara con cuatro (4) placas de especímenes que se pueden intercambiarse en el molde, para el cual en el desarrollo de las placas de los especímenes se realizó teniendo en cuenta los cinco (5) diferentes materiales polímeros seleccionados. Esto permitirá que se pueden inyectar los cinco (5) polímeros en las cuatro (4) placas de especímenes y, aspecto que permitirá obtener probetas para el análisis de los polímeros.

En el desarrollo del proyecto se tendrán en cuenta la cantidad de especímenes a inyectar por cada placa, la dirección de flujo del material, y la composición del molde, la cantidad de especímenes por placa es resultado del cálculo referente a la capacidad de la máquina y el balanceo volumétrico del molde, sin embargo, la dirección del flujo es la limitación, debido al requerimiento que las probetas no tengan concentradores de esfuerzo, aspecto que puede obtenerse al flujo de inyección debe ser laminar.

El molde debe ser una herramienta funcional, segura y con fácil intercambiabilidad de las placas. de los especímenes para la obtención de las probetas.

## CAPÍTULO 1. JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS, ANTECEDENTES Y ALCANCE

### 1.1 JUSTIFICACIÓN

Debido a la necesidad de investigar el comportamiento de los polímeros termoplásticos realizando ensayos en el laboratorio, es necesario contar con una herramienta (molde) el cual sea un apoyo para la obtención de probetas termoplásticas según las normas ASTM de uso común tales como, norma para ensayo de impacto Izod “ASTM D-256”, norma para ensayo de tensión “ASTM D-638 T1”, norma para ensayo de flexión “ASTM D-790” y norma para ensayo de impacto Garnerd “ASTM D-5420”.

Hoy en día, la universidad no cuenta con un equipo específico para este propósito de obtención de probetas termoplásticas según las normas ASTM mencionadas anteriormente, motivo por el cual se planea la fabricación de un molde multipropósitos con el cual se puedan inyectar cuatro (4) especímenes según las normas anteriormente mencionadas, y se puedan realizar con cinco (5) diferentes polímeros.

Teniendo una herramienta óptima para la obtención de diferentes probetas termoplásticas, los análisis de los diferentes ensayos se evaluarán teniendo la certeza que las probetas cumplen con los parámetros dimensionales y de flujo laminar del polímero del cual es inyectado.

La herramienta molde multipropósitos garantiza que la obtención de los especímenes es adecuada, debido a que la inyección de polímeros es una rama de la industria donde las piezas fabricadas por este método son en serie y cumplen con parámetros establecidos, tales como flujo laminar del polímero, dirección del flujo, tolerancias dimensionales.

### 1.2 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y fabricar un molde para la producción de probetas termoplásticas según las normas ASTM D-256, ASTM D-638 tipo 1, ASTM D-790 y ASTM D-5420.

### 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar un molde de acuerdo a la normalización ASTM D-256, ASTM D-638 tipo 1, ASTM D-790 y ASTM D-5420.
- Fabricar el molde por proceso de mecanizado por arranque de viruta de acero de acuerdo con el diseño de las probetas según la norma ASTM D-256, ASTM D-638 tipo 1, ASTM D-790 y ASTM D-5420,
- Realizar entrega y puesta a punto del molde y la verificación que las probetas inyectadas cumplan con las dimensiones de la norma ASTM D-256, ASTM D-638 tipo 1, ASTM D-790 y ASTM D-5420, con las cuales fueron calculados y diseñadas.

### 1.4 ANTECEDENTE DEL PROYECTO

Se determinó realizar este proyecto para uso en los laboratorios de investigación de la Universidad ECCI, donde frecuentemente se hacen los ensayos a materiales termoplásticos para la investigación del comportamiento de dichos materiales.

La Universidad no cuenta con el equipo para la producción de las probetas de los ensayos y a los estudiantes de las carreras de ingeniería les es difícil conseguir las probetas normalizadas para realizar las pruebas y hacer la comparación de los resultados, ya que no hay la garantía de que las probetas sean homogéneas.

Realizando este proyecto, se busca que la Universidad cuente con un equipo de producción, “molde” de probetas normalizadas de acuerdo con las normas ASTM D-256, ASTM D-638, ASTM D-790 y ASTM D-5420.

### 1.5 ALCANCE DEL PROYECTO

Involucrar varias temáticas de ingeniería, para el diseño, cálculo y fabricación de un molde multipropósitos para la inyección de probetas termoplásticos, donde se fabricará una placa de cavidades por cada espécimen según las normas ASTM D-256, ASTM D-638 tipo 1, ASTM D-790 y ASTM D-5420.

Se brindará a la Universidad ECCI una herramienta la cual tendrá la capacidad para producir probetas termoplásticas de cada norma por cada ciclo de inyección dependiendo de los resultados obtenidos en los cálculos y un total de cuatro (4) placas intercambiables de los especímenes indicados anteriormente. Estos especímenes pueden ser inyectados con (5) polímeros diferentes.

Este molde tendrá la capacidad de producir especímenes de las cuatro (4) normas mencionadas y cada espécimen lo puede hacer con variedad de cinco (5) polímeros

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 DEFINICIÓN DE POLÍMEROS

Los plásticos es la forma común como se denominan los polímeros de origen sintético. Polímero es una palabra de origen latín que significa poli = muchas y meros = partes. Los polímeros son moléculas grandes y largas, construidas a partir de otras moléculas más pequeñas y cortas llamadas monómeras o unidades estructurales. Se consideran macromoléculas por constar de miles de moléculas de monómeros. Para entender mejor el concepto de polímero, se puede suponer que un polímero es un tren muy largo, compuesto por muchísimos vagones y que cada vagón es un monómero o unidad estructural. Y estos a su vez pueden ser naturales o sintéticos. [1]

Los polímeros naturales se encuentran en plantas y animales, y los polímeros sintéticos se obtienen a partir del petróleo, gas natural o carbón, siendo la materia prima más importante el petróleo.

### 2.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS PLÁSTICOS.

Como sucede con otros materiales, existen ciertas ventajas y desventajas en la utilización de los plásticos. Los plásticos difieren de otros materiales en que suministran una combinación de propiedades más bien que una propiedad sobresaliente única. Esta característica contribuye muchísimo a la amplia utilización de los plásticos. Los plásticos pueden ser flexibles, livianos, rígidos y transparentes todo al mismo tiempo. Esta combinación de propiedades hace los plásticos sean ideales para muchas aplicaciones en donde otros materiales con una propiedad sobresaliente no son apropiados. [2]

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los polímeros

VENTAJAS	DESVENTAJAS
1. Rango de color	1. Dificultad de reparación
2. Aislante térmico (Caliente – Frio)	2. Inestabilidad a alta temperatura



3. Aislantes eléctricos	3. Inestabilidad dimensional
4. Resistencia a la corrosión	4. Costo
5. Reducción de peso	5. Deterioro por radiación y por solventes
6. Facilidad de procesamiento	

## 2.3 NATURALEZA Y ESTRUCTURA DE LOS POLÍMEROS.

Un polímero es una molécula grande construida por la repetición de unidades moleculares simples, llamadas MEROS. La ciencia de las macromoléculas incluye dos campos importantes: las grandes moléculas biológicas base de la vida y de los alimentos y los polímeros para la Ingeniería, tales como los materiales sintéticos o plásticos, las fibras, los elastómeros y los materiales orgánicos naturales tales como la madera, el caucho, el cuero, el fieltro y el corcho.

En los materiales orgánicos naturales, las grandes moléculas son construidas por la naturaleza y en los materiales artificiales, estas grandes moléculas se construyen por síntesis, uniendo deliberadamente moléculas pequeñas.

En algunos polímeros la repetición de unidades es lineal, en forma similar a la construcción de una cadena por unión de eslabones. En otros casos las cadenas son ramificadas o interconectadas para formar retículos tridimensionales. La unidad que se repite en el polímero es generalmente equivalente o casi equivalente a la del monómero o material a partir del cual se forma el polímero. [2]

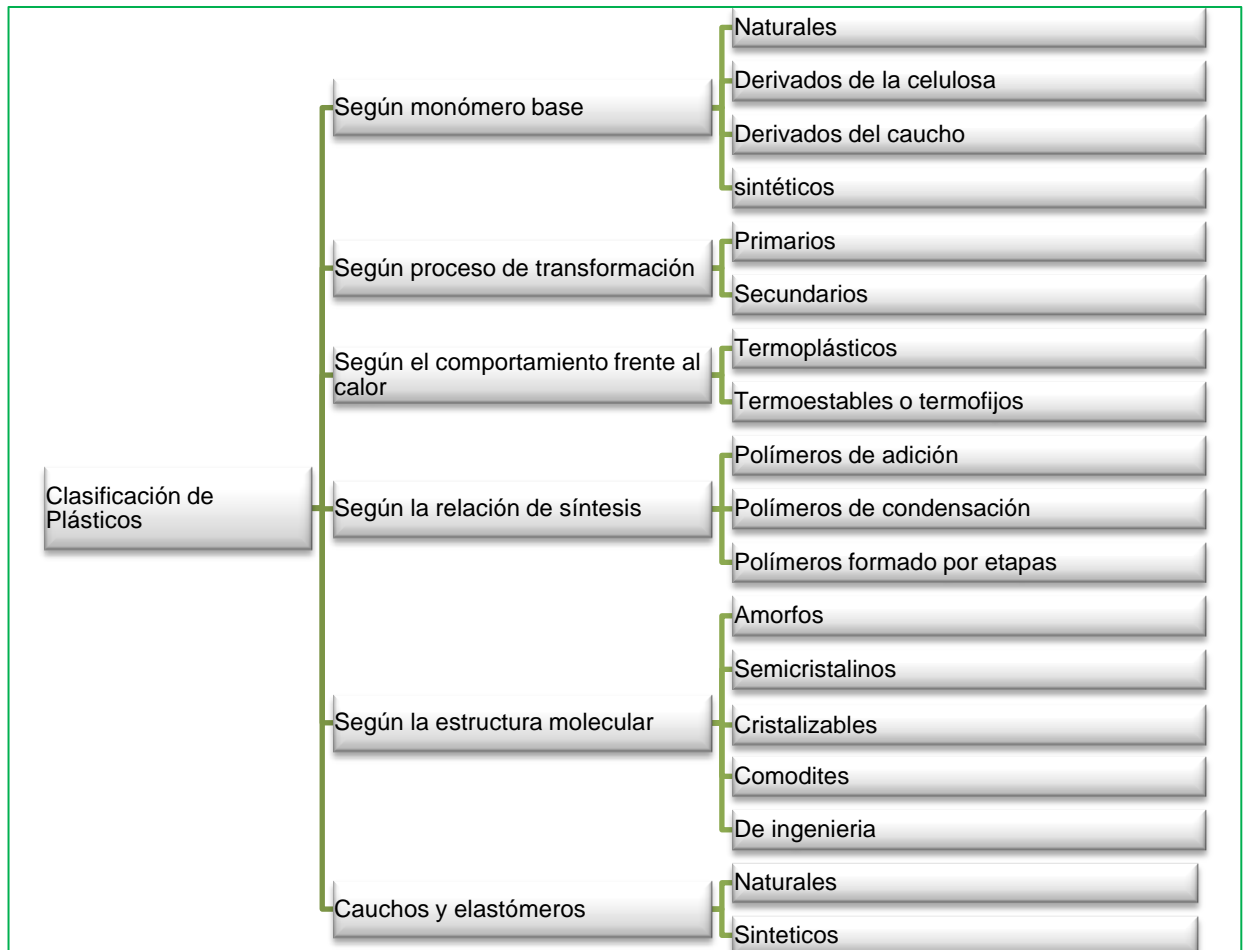
## 2.4 CLASIFICACIÓN DE POLÍMEROS

Existe una gran variedad de polímeros para la clasificación, en este texto se hace una clasificación general basada en los documentos teóricos de clasificación de polímeros, donde se enunciarán los polímeros según: Monómero base, procesos de transformación, comportamiento frente al calor, relación de síntesis, estructura molecular, cauchos y elastómeros. [3]. Como se muestran en la Figura 1.

- Según monómero base. En esta clasificación se considera el origen del monómero del cual parte la producción del polímero. **Naturales:** Son los polímeros cuyos monómeros son derivados de productos de origen natural con ciertas características como, por ejemplo, la celulosa, la caseína y el caucho.

**Sintéticos:** Son aquellos que tienen origen en productos elaborados por el hombre, principalmente derivados del petróleo.

Figura 1. Clasificación de polímeros [3]



Fuente. Autor

- Según su comportamiento frente al calor. **Termoplástico**, es un plástico el cual, a temperatura ambiente es plástico o deformable, se derrite a un líquido cuando es calentado y se endurece en un estado vítreo cuando es suficientemente enfriado. **Termoestables:** Un material termoestable se produce por una reacción química que tiene dos etapas: La primera etapa resulta en la formación de moléculas de cadena larga similares a las que están presentes en los termoplásticos, pero que aún son capaces de reaccionar posteriormente. La segunda etapa de la reacción tiene lugar durante el moldeo

por aplicación de calor y presión. El moldeado resultante será rígido cuando se enfría, pero se ha desarrollado una estructura RETICULAR dentro del material, durante la segunda etapa, las cadenas moleculares largas se han interconectado por enlaces fuertes de tal forma que el material no podrá suavizarse de nuevo por aplicación de calor, cuando se aplica un exceso de calor estos materiales se degradan y se carbonizan.

- Según la reacción de síntesis. También pueden clasificarse según la reacción que produce el polímero: **Polímeros de adición:** Implican siempre la ruptura o apertura de una unión del monómero para permitir la formación de una cadena. En la medida que las moléculas son más largas y pesadas, la cera parafínica se vuelve más dura y más tenaz. **Polímeros de condensación:** Son aquellos en los que la reacción tiene lugar entre grupos funcionales reactivos presentes en los monómeros. Debe tener, por lo menos, dos grupos reactivos por monómero para darle continuidad a la cadena. **Polímeros formados por etapas:** La cadena de polímero va creciendo gradualmente mientras haya monómeros disponibles, añadiendo un monómero cada vez. Esta categoría incluye todos los polímeros de condensación de Carothers y además algunos otros que no liberan moléculas pequeñas, pero sí se forman gradualmente.
- Según su estructura molecular. **Amorfos:** Son amorfos los plásticos en los que las moléculas no presentan ningún tipo de orden; están dispuestas aleatoriamente sin corresponder a ningún orden. Al no tener orden entre cadenas se crean unos huecos por los que pasa la luz, por esta razón los polímeros amorfos son transparentes. **Semicristalinos:** Los polímeros semicristalinos tienen zonas con cierto tipo de orden junto con zonas amorfas. En este caso al tener un orden existen menos huecos entre cadenas por lo que no pasa la luz a no ser que posean un espesor pequeño. **Cristalinos:** Según la velocidad de enfriamiento, puede disminuirse (enfriamiento rápido) o incrementarse (enfriamiento lento) el porcentaje de cristalinidad de un polímero semicristalino, sin embargo, un polímero amorfo, no presentará cristalinidad, aunque su velocidad de enfriamiento sea extremadamente lenta. **Comodities:** Son aquellos que tienen una fabricación, disponibilidad, y demanda mundial, tienen un rango de precios internacional y no requieren gran tecnología para su fabricación y procesamiento. **De ingeniería:** Son los materiales que se utilizan de manera muy específica, creados prácticamente para cumplir una determinada función, requieren tecnología especializada para su fabricación o su procesamiento y de precio relativamente alto.

- **Elastómeros o Cauchos.** Los elastómeros se caracterizan por su elevada elasticidad y la capacidad de estiramiento y rebote, recuperando su forma primitiva una vez que se retira la fuerza que los deformaba. Comprenden los cauchos naturales y sintéticos.

## 2.5 ESTRUCTURA MOLECULAR.

**Regularidad estructural Simetría:** La presencia de anillos de fenileno en una cadena puede dar origen a tres distintas estructuras. De ellas, la primera es la de mayor simetría y representa un polímero más cristalino que los otros. [4]

**Número par vs. Número de átomos de carbono entre grupos funcionales:** En el caso de las poliamidas y de los poliésteres, cristalizan mejor los materiales con número par de carbonos entre grupo amídicos o grupos éster respectivamente y cuanto mayor es la cristalinidad, más alto es el punto de fusión. Cuando el número es par, las cadenas son asimétricas. [4]

**Tacticidad:** Los polímeros isotácticos y los sindiotácticos tienen regularidad estructural y son cristalinos, mientras que los atácticos son amorfos. Los polímeros isotácticos y los sindiotácticos tienen mayor cristalinidad, mayor resistencia mecánica, mayor densidad, más alta temperatura de fusión, son más resistentes a la acción de los disolventes, y poseen menor transparencia, en comparación con los mismos materiales en la variedad atáctica. [4]

**Configuración CIS vs. TRANS:** Existen dos tipos de hule natural que provienen del isopreno. La primera se llama configuración CIS y así es el hule del hevea y el de Guayule que se caracterizan por su flexibilidad y su elasticidad, la cual deben en parte a su estructura CIS, que es irregular y les impide cristalizar. En cambio, la configuración TRANS, con gran regularidad estructural, está presente en el hule de gutapercha, que es cristalino, mucho menos elástico, con alta adherencia, por lo que se lo emplea como cubierta de pelotas de golf. [4]

**Ramificaciones:** El ejemplo más claro de las ramificaciones sobre el grado de cristalinidad es el polietileno. Estas ramificaciones dificultan la aproximación de las cadenas y su colocación ordenada, disminuyendo el grado de cristalinidad, dejando grandes espacios entre las cadenas y por ello el material tiene mayor densidad. Por lo mismo, las fuerzas de atracción entre cadenas adyacentes no pueden actuar plenamente y, al ser menor la fuerza de cohesión, el calor separa con mayor facilidad las cadenas y el polímero se reblandece a menor temperatura, tiene menor rigidez, mejor resistencia al impacto y mayor transparencia y flexibilidad que el de alta densidad. [4]

**Peso molecular:** Los grupos químicos que se encuentran en los extremos de las cadenas, no son iguales que el resto de las unidades estructurales y le restan regularidad a la estructura. También tienen mayor movilidad, puesto que están unidos a la cadena de un solo lado. Estos dos factores interfieren en la cristalización. Como los polímeros de bajo peso molecular tienen una alta concentración de extremos, también tienen, en general, una baja cristalinidad. Por otra parte, los polímeros de muy alto peso molecular tienen dificultad para cristalizar, debido a que las cadenas muy largas se enmarañan más.

La consecuencia de todo esto es que, para cada polímero, hay un intervalo intermedio de pesos moleculares en que el grado de cristalinidad es máximo. [4]

**Copolimerización:** La copolimerización por lo general destruye la regularidad estructural y baja el grado de cristalinidad a lo menos de que se trate de copolímeros alternados. La copolimerización se usa industrialmente para reducir la temperatura de fusión de poliésteres y poliamidas que se usan en adhesivos de fusión en caliente (hot melts). [4]

**Plastificantes:** Los plastificantes son sustancias que se agregan a los polímeros para impartirles mayor flexibilidad. Si se incorpora un plastificante a un polímero cristalino, se reduce la cristalinidad, se vuelve más flexible y se reblandece a menor temperatura. [4]

**Polimerización:** La reacción por la cual se sintetiza un polímero a partir de sus monómeros se denomina polimerización. Según el mecanismo por el cual se produce la reacción de polimerización para dar lugar al polímero, ésta se clasifica como "polimerización por pasos" o como "polimerización en cadena". En cualquier caso, el tamaño de la cadena dependerá de parámetros como la temperatura o el tiempo de reacción, teniendo cada cadena un tamaño distinto y, por tanto, una masa molecular distinta, de ahí que se hable de masa promedio del polímero. [4]

**La polimerización en etapas (condensación)** necesita al menos monómeros bifuncionales. La estructura puede ser lineal o también ramificada (aparte de poder presentar entrecruzamientos). También pueden adoptar otras estructuras, por ejemplo, radiales.

Por otra parte, los polímeros pueden ser lineales, formados por una única cadena de monómeros, o bien esta cadena puede presentar ramificaciones de mayor o menor tamaño. También se pueden formar entrecruzamientos provocados por el enlace entre átomos de distintas cadenas.

La naturaleza química de los monómeros, su masa molecular y otras propiedades físicas, así como la estructura que presentan, determinan diferentes características para cada polímero.

Los enlaces de carbono en los polímeros no son equivalentes entre sí, por eso dependiendo del orden estereoquímico de los enlaces, un polímero puede ser: atáctico (sin orden), isotáctico (mismo orden), o sindiotáctico (orden alternante) a esta conformación se la llama Tacticidad. Las propiedades de un polímero pueden verse modificadas severamente dependiendo de su estereoquímica.

Los monómeros que conforman la cadena de un copolímero se pueden ubicar en la cadena principal alternándose según diversos patrones, denominándose copolímero alternante, copolímero en bloque, copolímero aleatorio, copolímero de injerto. Para lograr este diseño, la reacción de polimerización y los catalizadores deben ser los adecuados.

Finalmente, los extremos de los polímeros pueden ser distintos que el resto de la cadena polimérica, sin embargo, es mucho más importante el resto de la cadena que estos extremos debido a que la cadena es de una gran extensión comparada con los extremos. [4]

**Promedio del peso molecular. “Distribución de pesos moleculares”:** Los polímeros no son especies químicas puras, porque no tienen un peso molecular, punto de fusión definidos.

Son mezclas de especies, cada una con un peso molecular determinado ( $M_i$ ) y por lo tanto, para caracterizar una muestra de polímero no podemos determinar su peso molecular, sino su distribución de pesos moleculares, la proporción (generalmente en peso,  $w_i$ ) de cadenas de cada  $M_i$  que forma la mezcla. [4]

## 2.6 CARACTERÍSTICAS DE LOS POLÍMEROS

**2.6.1 Reología.** La reología (del griego reos, fluir y logos, estudio) es la ciencia del flujo y la deformación de la materia, describe la interrelación entre fuerzas, deformaciones y tiempo. La reología es aplicable a todos los materiales, desde los gases hasta los sólidos. La ciencia de la reología tiene apenas 80 años, fue fundada por dos científicos en los años veinte quienes tuvieron la necesidad común de describir las propiedades de flujo de fluidos. [5]

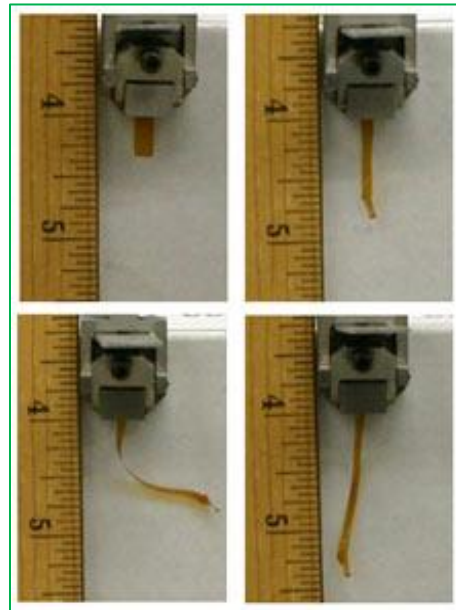
Las propiedades mecánicas estudiadas por la reología se pueden medir mediante reómetros, aparatos que permiten someter al material a diferentes tipos de deformaciones controladas y medir los esfuerzos o viceversa. Algunas de las propiedades reológicas más importantes son:

- Viscosidad aparente (relación entre esfuerzo de corte y velocidad de corte).
- Coeficientes de esfuerzos normales.
- Viscosidad compleja (respuesta ante esfuerzos de corte oscilatorio).

- Módulo de almacenamiento y módulo de pérdidas (comportamiento viscoelástico lineal).
- Funciones complejas de viscoelasticidad no lineal.

Los estudios teóricos en Reología en ocasiones emplean modelos microscópicos para explicar el comportamiento de un material. Uno de ellos es el estudio de polímeros, estos se pueden representar como cadenas de esferas conectadas mediante enlaces rígidos o elásticos. En la Figura 2, se observa la medición de un material, donde se evidencia la reología aplicada a los polímeros.

Figura 2. Ilustración Reología[6]



Fuente: PLAEN - Plásticos, Envasado y Afines

2.6.2 Reología rotacional. La reometría rotacional es una técnica poderosa para la medición de la reología de cizallamiento compleja en todo tipo de materiales; es lo suficientemente sensible como para medir la viscosidad de soluciones de polímeros diluidas, y sin embargo lo suficientemente robusta como para medir la visco-elasticidad de polímeros o compuestos de módulo alto. La reometría rotacional es ideal para detectar cambios estructurales y de composición de materiales, que pueden ser factores críticos de control para las propiedades de flujo y deformación, y en última instancia, para la estabilidad y el desempeño del producto. Disponemos de diferentes tipos de reómetros tanto de esfuerzo de



cizalla, deformación como capilares, si el objetivo es medir simplemente la viscosidad como una función de la velocidad de deformación para determinar el comportamiento de flujo No-Newtoniano o si el objetivo es medir las propiedades reológicas complejas como la viscoelasticidad en función de la frecuencia (tiempo) o temperatura. En la Figura 3, se muestra un viscosímetro rotacional en la cual se realizan las mediciones de reología rotacional. [7]

Figura 3. Ilustración viscosímetro rotacional.[8]



Fuente. [8]

2.6.3 Índice de fluidez del material (Melt flow index). El índice de fluidez es una prueba reológica básica que se realiza a un polímero para conocer su fluidez. Se mide en g/min. El índice de fluidez consiste en tomar una cantidad de polímero a una temperatura conocida arriba de su Temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) y obligarlo con la fuerza de gravedad y un peso dado a través de un orificio por un tiempo determinado, (según la norma que se utilice, ASTM).

La fluidez del polímero es función de Presión utilizada (peso del émbolo), Diámetro del orificio, Viscosidad del material. La Figura 4 ilustra el comparativo del movimiento de un fluido. [9]



Figura 4. Índice de fluidez



Fuente: investigación [www.yumpu.com](http://www.yumpu.com)

Este índice es de vital importancia para quienes hacen moldeo por inyección, extrusión, Roto moldeo u otro proceso que implique el confeccionamiento de una pieza termoplástica. No es una propiedad intrínseca del polímero sino un parámetro empírico que depende de las propiedades físicas y de la estructura molecular del polímero. La medida del índice de fluidez es inversamente proporcional a la viscosidad del material en estado fundido y ésta también lo es al peso molecular del polímero.

## 2.7 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS POLÍMEROS

Las propiedades mecánicas de los polímeros son una consecuencia directa de su composición, así como de la estructura molecular tanto a nivel molecular como súper molecular. Actualmente las propiedades mecánicas de interés son las de los polímeros y estas han de ser mejoradas mediante la modificación de la composición o morfología para, por ejemplo, cambiar la temperatura a la que los polímeros se ablandan y recuperan el estado de sólido elástico o también el grado global del orden tridimensional. [10]

Normalmente el incentivo de estudios sobre las propiedades mecánicas es generalmente debido a la necesidad de correlacionar la respuesta de diferentes materiales bajo un rango de condiciones con objeto de predecir el desempeño de estos polímeros en aplicaciones prácticas. Durante mucho tiempo los ensayos han sido realizados para comprender el comportamiento mecánico de los materiales plásticos a través de la deformación de la red de polímeros reticulados y cadenas moleculares enredadas, pero los esfuerzos para describir la deformación de otros

polímeros sólidos en términos de procesos operando a escala molecular son más recientes. [10]

**2.7.1 Tensión.** En física e ingeniería, se denomina tensión mecánica a la fuerza por unidad de área en el entorno de un punto material sobre una superficie real o imaginaria de un medio continuo. La definición anterior se aplica tanto a fuerzas localizadas como fuerzas distribuidas uniformemente o no, que actúan sobre una superficie. Si se considera un cuerpo sometido a un sistema de fuerzas y momentos de fuerza, se puede observar la acción de las tensiones mecánicas si se imagina un corte mediante un plano imaginario que divida el cuerpo en dos partes. Para que cada parte estuviera en equilibrio mecánico sobre la superficie de corte de cada una de las partes debería restablecerse la interacción que ejercía la otra parte del cuerpo. Así, sobre cada elemento de la superficie ( $dS$ ), debe actuar una fuerza elemental ( $dF$ ), a partir de la cual se define un vector tensión ( $t_n$ ) como el resultado de dividir dicha fuerza elemental entre la superficie del elemento. [10]

**2.7.2 Flexión.** En ingeniería se denomina flexión al tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal. El término "alargado" se aplica cuando una dimensión es dominante frente a las otras. Un caso típico son las vigas, las que están diseñadas para trabajar principalmente por flexión. Igualmente, el concepto de flexión se extiende a elementos estructurales superficiales como placas o láminas. El rasgo más destacado es que un objeto sometido a flexión presenta una superficie de puntos llamada fibra neutra tal que la distancia a lo largo de cualquier curva contenida en ella no varía con respecto al valor antes de la deformación. El esfuerzo que provoca la flexión se denomina momento flector. [10]

**2.7.3 Impacto.** "Prueba de impacto". Las pruebas de impacto se utilizan en ingeniería de polímeros para estudiar la tenacidad de un material. Este material puede ser un polímero, un copolímero o un polímero reforzado. Existen de acuerdo a Charpy dos tipos de prueba de impacto: (Prueba de impacto con flexión y Prueba de impacto con flexión y muesca). Otras pruebas de impacto no incluidas en Charpy incluyen: (Prueba a la caída, Pruebas de impacto a alta velocidad). La tenacidad al impacto se mide en  $\text{kJ/m}^2$ . Debido a las características termoplásticas de los polímeros, las pruebas de impacto requieren cierta velocidad en su actuación, velocidades lentas producen más bien movimientos de deformación

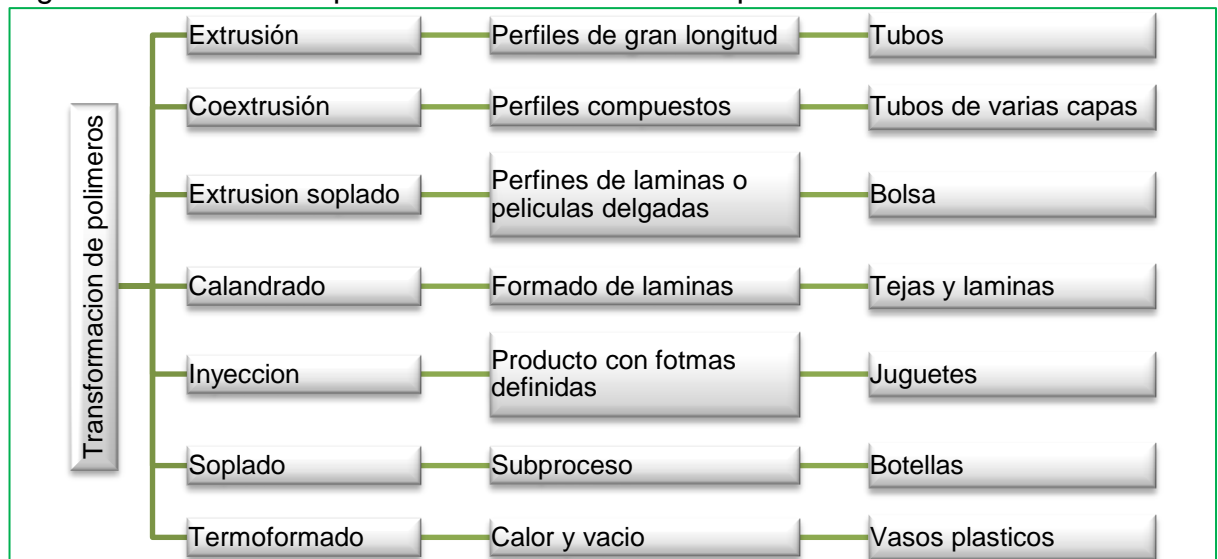
plástica o creep, permitiendo a los segmentos de las macromoléculas la relajación de esfuerzos. Las velocidades para impacto incluyen el rango de  $10^{-1} - 10^0 \text{ s}^{-1}$ . [10]

**2.7.4 Compresión.** El esfuerzo de compresión es la resultante de las tensiones o presiones que existe dentro de un sólido deformable o medio continuo, caracterizada porque tiende a una reducción de volumen o un acortamiento en determinada dirección. En general, cuando se somete un material a un conjunto de fuerzas se produce tanto flexión, como cizallamiento o torsión, todos estos esfuerzos conllevan la aparición de tensiones tanto de tracción como de compresión. Aunque en ingeniería se distingue entre el esfuerzo de compresión (axial) y las tensiones de compresión. [10]

## 2.8 TRANSFORMACIÓN DE POLÍMEROS.

Los procesos de transformación de polímeros están basados en el calentamiento del material, la homogenización del material fundido, dar forma específica al material fundido y posterior enfriamiento y endurecimiento para obtener un producto final. Para el desarrollo de este proyecto se involucrará la temática de inyección de plásticos. La Figura 5 un resumen de los principales procesos de transformación de polímeros y sus principales productos finales.

Figura 5. Clasificación procesos de transformación polímeros



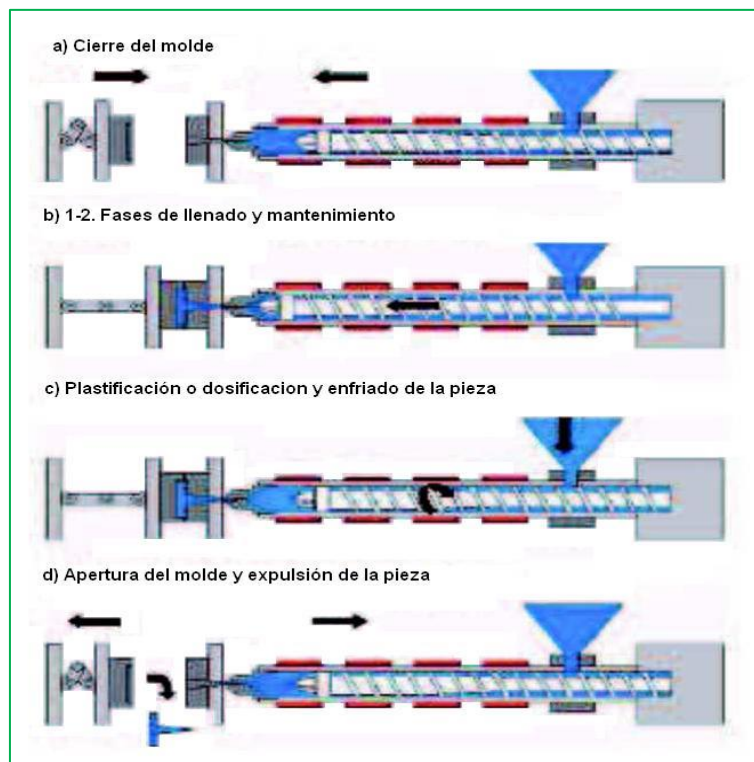
Fuente. Autor

## 2.9 CICLO DE INYECCIÓN DE PLÁSTICOS

La inyección de plásticos es un proceso para la obtención de producto terminado, este proceso requiere de una máquina de inyección, de un proceso de inyección con parámetros definidos de material y producto final, y una herramienta o utillaje a la que se le llama molde de inyección. [11]

**Etapas (A) de inyección:** Definiéndose como “cierre del molde e inicio de la inyección” es cuando cierra el molde vacío y se tiene listo el material fundido dentro del barril para inyectar en el molde. El molde se cierra en tres pasos, paso (1) Alta velocidad y baja presión, paso (2) Se disminuye la velocidad y se mantiene la baja presión hasta que hace contacto la placa móvil y la placa fija del molde, y paso (3) Se aplica la presión necesaria para alcanzar la fuerza de cierre requerida para el proceso de inyección. [11]

Figura 6. Ciclo de inyección [11]



Fuente. [11]

**Etapla (B) de inyección:** Denominada “llenado y mantenimiento”. El tornillo inyecta el material fundido de forma lineal, sin girar, forzando el material a pasar a través de la boquilla hacia las cavidades del molde con una determinada presión de inyección. “Aplicación de la presión de sostenimiento”. Al terminar de inyectar el material, se mantiene el tornillo adelante aplicando una presión de sostenimiento antes de que se solidifique, con el fin de contrarrestar la contracción de la pieza durante el enfriamiento. La presión de sostenimiento, usualmente, es menor que la de inyección y se mantiene hasta que la pieza comienza a solidificarse. [11]

**Etapla (C) de inyección,** Denominada “Plastificación o dosificación y enfriamiento de la pieza”. El tornillo gira haciendo circular los gránulos de plástico desde la tolva hacia el tornillo. El material fundido es suministrado hacia la parte delantera del tornillo, donde se genera una presión contra la boquilla cerrada, obligando al tornillo a retroceder hasta que se acumula el material necesario para la inyección. [11]

**Etapla (D) de inyección:** Denominada “apertura del molde y expulsión de la pieza”. El material dentro del molde se continúa enfriando en donde el calor es disipado por el fluido refrigerante. Una vez terminado el tiempo de enfriamiento, la parte móvil del molde se abre y la pieza es extraída. [11]

## 2.10 NORMATIVIDAD.

La normativa se refiere al establecimiento de reglas o leyes dentro de cualquier grupo u organización. Se refiere a los parámetros establecidos para el cumplimiento de los lineamientos de un proceso, de tal forma que el proceso se lleve de manera en que los resultados obtenidos cumplan los parámetros finales inicialmente delimitados dentro de las tolerancias establecidas por la norma del proceso. En relación con la normatividad de los especímenes ASTM para ensayos de materiales termoplásticos, se enuncian a continuación las normas ASTM D-256, D-638 tipo 1, D-790 y D-5420.

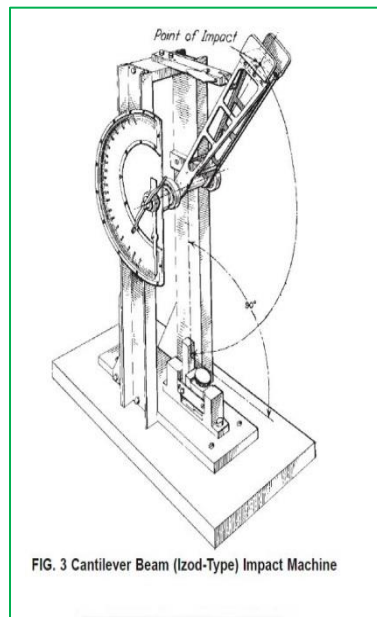
2.10.1 Norma ASTM D-256 (Prueba de impacto Izod). Método de prueba estándar para determinar la resistencia de los plásticos al impacto péndulo Izod. [12]

Este método de ensayo se refiere a la determinación de la resistencia de los plásticos estandarizado montado en máquinas de martillos tipo péndulo, para romper los especímenes estándar con una oscilación del péndulo, las pruebas estándar de estos métodos de ensayo requieren muestras realizadas con una

muesca maquinada. En los métodos de prueba A, C y D, la muesca produce una concentración de tensión que aumenta la probabilidad de una fractura frágil, en lugar de una fractura dúctil. En el método de ensayo E, en la resistencia al impacto se obtiene ruptura por choque a la flexión según lo indicado por la energía extraída de la muestra mediante la inversión de 180° con muescas en la prensa de sujeción. Los resultados de todos los métodos de prueba se exponen en términos de energía absorbida por unidad de ancho de la muestra o por unidad de área de sección transversal en la muesca.

Las máquinas con sus martillos tipo péndulo se han estandarizado, y deben cumplir con ciertos requisitos, incluyendo una altura fija de la caída del martillo que da lugar a una velocidad constante del martillo en el momento del impacto. Los martillos de diferentes energías iniciales, producido por la variación de sus pesos efectivo, son recomendados para uso con diferentes muestras de resistencia a los impactos, además, a los fabricantes de los equipos se les permiten utilizar diferentes longitudes y las construcciones de los péndulos con las posibles diferencias en la rigidez del péndulo resultante. Pueden existir diferencias en el diseño de las máquinas.

Figura 7. Máquina de martillo para prueba impacto Izod. [12]



Fuente: [12]

Las muestras estandarizadas están obligadas a tener una longitud fija, una profundidad fija, y un diseño particular de la muesca establecida. El ancho de los especímenes se permite variar entre los límites. Los resultados generados con péndulos que utilizan una célula de carga para registrar la fuerza del impacto, y por lo tanto la energía de impacto, no pueden ser equivalente a los resultados que se generan utilizando probadores de forma manual o digitalmente codificados que miden la energía que queda en el péndulo después del impacto. La muesca en el espécimen Izod sirve para concentrar la tensión, reducir al mínimo la deformación plástica, y dirigir la fractura de la parte del espécimen detrás de la muesca.

La dispersión de la energía se reduce al romper el espécimen. Sin embargo, debido a las diferencias en las propiedades elásticas y visco-elásticas de plástico, la respuesta a una mella dada varía entre los materiales. Una medida de la sensibilidad de un plástico de “muesca” puede ser obtenida con el método de prueba D mediante la comparación de las energías para romper con los especímenes de diferentes radios en la base de la muesca.

Se debe tener precaución en la interpretación de los resultados de estos métodos de prueba estándar. Los parámetros de prueba siguientes pueden afectar los resultados de manera significativa: Método de fabricación, incluyendo pero no limitado a la tecnología de procesamiento, las condiciones de moldeo, diseño del molde, y los tratamientos térmicos; Método de muescas; Velocidad de muescas en la herramienta; El diseño de muescas en los aparatos; La calidad de la escotadura; El tiempo entre entallado y de prueba; El espesor de la probeta de ensayo; El ancho de prueba muestra en la muesca, y El condicionamiento del medio ambiente.

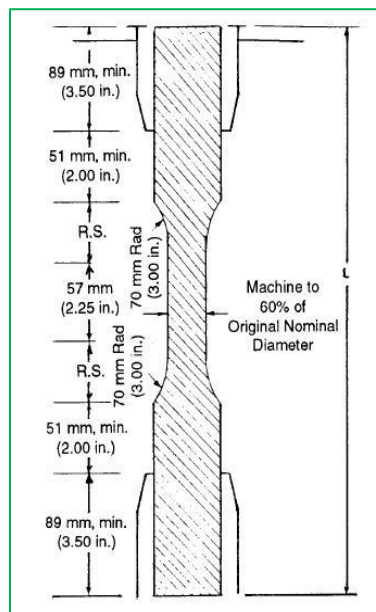
El tipo de fallo para cada muestra se registrará como una de las cuatro categorías de la siguiente manera: **C: Ruptura completa:** Una ruptura en el espécimen es cuando se divide en dos o más piezas. **H: Ruptura doblada:** Una de ruptura incompleta, de modo que una parte del espécimen no puede mantenerse por encima de la horizontal cuando la otra parte está en posición vertical (menos de 90° ángulo incluido). **P: ruptura parcial:** Una ruptura incompleta que no cumple con la definición de una ruptura bisagra, pero se ha fracturado por lo menos el 90% de la distancia entre el vértice de la muesca y el lado opuesto. **NB: No Rotura:** Una ruptura incompleta, donde la fractura se extiende a menos de 90% de la distancia entre el vértice de la muesca y el lado opuesto. Para materiales duros, el péndulo no puede tener la energía necesaria para completar la ruptura de las fibras extremas y echar la pieza rota o piezas. Los resultados obtenidos de “non break” los especímenes se considerará como una desviación estándar y no se reportado como un resultado estándar. La resistencia al impacto, no se pueden comparar directamente por cualquier material que la experiencia de diferentes tipos de fallo como se define en el método de prueba por este código.



### 2.10.2 Norma ASTM D-638 tipo 1 (Prueba de tensión). Método de prueba estándar para las propiedades de tracción de los plásticos. [13]

Este método de prueba cubre la determinación de las propiedades de tracción de los plásticos no reforzados y reforzados en la forma estándar de las probetas en forma de pesa de gimnasia cuando se prueba bajo condiciones definidas de tratamiento previo, temperatura, humedad, y velocidad de la máquina de pruebas. Este método puede ser utilizado para los ensayos de materiales de cualquier espesor hasta 14 mm [0,55 pulgadas]. Sin embargo, para las pruebas de especímenes en forma de láminas delgadas, incluyendo películas inferiores a 1,0 mm [0,04 pulgadas] de espesor, Métodos de Prueba D 882 es el método de prueba preferida. Los materiales con un espesor superior a 14 mm [0,55 pulgadas] debe ser fabricada por mecanizado. Este método de ensayo incluye la opción de determinar el coeficiente de Poisson, a temperatura ambiente.

Figura 8. Máquina de prueba Tensión.[13]



Fuente: [13]

Este método no se destina a cubrir los procedimientos físicos precisos. Se reconoce que la constante de velocidad del tipo de movimiento de la cruceta de la prueba deja mucho que desear desde el punto de vista teórico, que diferencias pueden existir entre la tasa de movimiento de la cruceta y el ritmo de la tensión entre las marcas de medidor en la muestra, y se especificó que las pruebas de



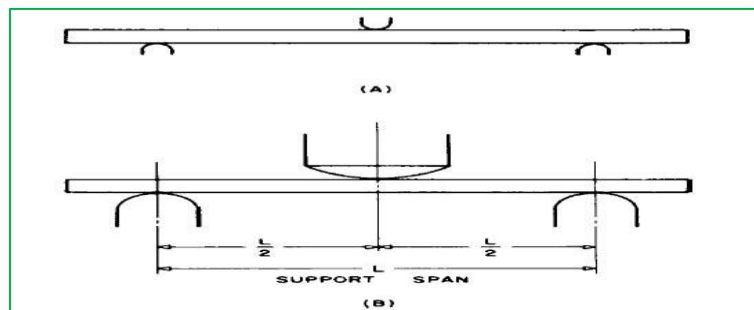
velocidad ocultan efectos importantes en las características de los materiales en estado plástico. Además, se observa que las variaciones en los espesores de las probetas, los cuales son permitidos por estos procedimientos, producen variaciones en las relaciones de volumen en la superficie de esos especímenes, y que estas variaciones pueden influir en los resultados de la prueba. Por lo tanto, donde los resultados son directamente comparables es preferible que, todas las muestras sean del mismo grosor. Para pruebas especiales adicionales deben ser utilizados datos físicos más precisos, son necesarios.

Las Propiedades de tracción pueden variar con la preparación de muestras y con la velocidad y el medio ambiente de la prueba. Por consiguiente, cuando se requieren comparar los resultados, estos factores deben ser cuidadosamente controlados.

**Coefficiente de Poisson:** Cuando la fuerza de tracción uniaxial se aplica a un sólido, los tramos sólidos en la dirección de la fuerza aplicada (axial), pero también los contratos, tanto en dimensiones laterales a la fuerza aplicada. Si el sólido es homogéneo e isótropo, y los restos materiales elásticos bajo la acción de la fuerza aplicada, la deformación lateral tiene una relación constante con la deformación axial. Esta constante, llamada coeficiente de Poisson, se define como el cociente negativo de la transversal (negativa) a la deformación axial bajo tensión uniaxial. El coeficiente de Poisson se utiliza para el diseño de estructuras en las que todos los cambios de las dimensiones resultantes de la aplicación de la fuerza deben ser tenidos en cuenta y en la aplicación de la teoría generalizada de la elasticidad para el análisis estructural.

2.10.3 Norma ASTM D-790 (Prueba de flexión). Métodos de prueba estándar para las propiedades de flexión de plásticos no reforzados y reforzadas y materiales de aislamiento eléctrico.[14]

Figura 9. Máquina de prueba Flexión [14]



Fuente: [14]

Estos métodos de ensayo referirse a la determinación de las propiedades de flexión de plásticos no reforzados y reforzados, incluidos los de alto módulo de materiales compuestos y materiales aislantes eléctricos en forma de barras rectangulares moldeadas directamente o corte de las hojas, placas o formas moldeadas. Estos métodos de ensayo son generalmente aplicables a materiales rígidos y semirrígidos. Sin embargo, la resistencia a la flexión no se puede determinar para aquellos materiales que no se rompan o que no fallan en la superficie exterior de la probeta de ensayo dentro del límite de tensión de 5.0% de estos métodos de prueba. Este método de prueba utiliza un sistema de carga de tres puntos que se aplica a una viga simplemente apoyada.

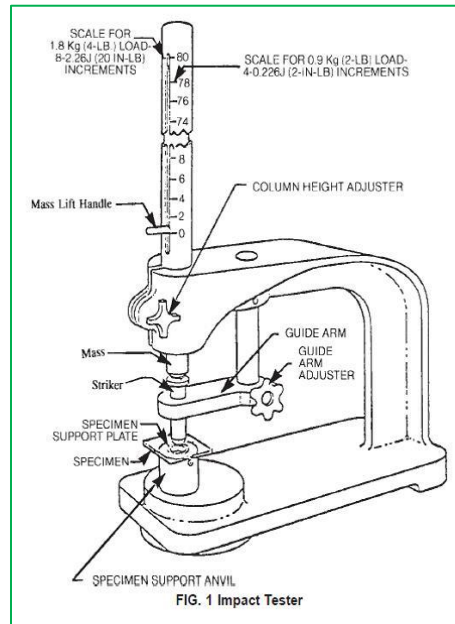
El Procedimiento (A), diseñado principalmente para los materiales que se rompen las desviaciones relativamente pequeñas. El Procedimiento B, diseñado especialmente para aquellos materiales que se someten a grandes deformaciones durante la prueba.

El procedimiento (A) se utiliza para la medición de las propiedades de flexión, el módulo sobre todo a la flexión, a menos que las especificaciones del material de otro modo. El Procedimiento (B) puede ser utilizado para la medición de la resistencia a la flexión solamente. Tangencial a el módulo de datos obtenidos por el procedimiento (A) tiende a mostrar una menor desviación estándar de datos comparables obtenidos mediante el procedimiento (B). Las Propiedades de flexión según lo determinado por estos métodos de prueba son especialmente útiles para el control de calidad y especificaciones. Los materiales que no fallan por la tensión máxima permitida en virtud de estos métodos de ensayo (3 puntos de inflexión) pueden ser más adecuados para un ensayo de flexión de 4 puntos. La diferencia fundamental entre los dos métodos de prueba está en la ubicación del momento máximo de flexión y tensiones máximas de fibra axial. Las tensiones máximas de fibra axial ocurren en una línea debajo de la nariz de carga en flexión de 3 puntos y en el área entre la nariz de carga en flexión de 4 puntos. Las Propiedades de flexión puede variar con la profundidad de la muestra, la temperatura, las condiciones atmosféricas, y la diferencia en la tasa de esfuerzo como se especifica en los Procedimientos A y B. Norma ASTM D-790. Antes de continuar con estos métodos de prueba, se debe hacer referencia a la especificación del material a ensayar. Los parámetros de cualquier preparación de las muestras de prueba, el acondicionamiento, las dimensiones, o pruebas, o combinación de ellos, cubiertos en la especificación de los materiales tendrán prioridad sobre los mencionados en método de prueba.

2.10.4 Norma ASTM D-5420 (Prueba de impacto Gardner). Método de prueba estándar para resistencia al impacto de la pieza plana, de plástico rígido por medio de un delantero impactador por peso que cae (Impacto Gardner). [15]

Este método de prueba cubre la determinación de la clasificación relativa de los materiales de acuerdo con la energía necesaria para romper o destruir especímenes planos, de plástico rígido en diferentes condiciones de impacto especificado de un delantero afectadas por un peso que cae.

Figura 10. Máquina de prueba impacto Gardner.[15]



Fuente: [15]

Los plásticos viscoelástico son tratados y por lo tanto, es posible que sean sensibles a los cambios en la velocidad de caída de peso en su superficie. Sin embargo, la velocidad de un objeto en caída libre es una función de la raíz cuadrada de la altura de caída. A cambio de un factor de dos en la altura de caída provocará un cambio de sólo en la velocidad, encontrando que la energía media de fallos de láminas se mantuvo constante en altura de caída entre 0,30 y 1,4 m. Diferentes materiales responden de manera diferente a los cambios en la velocidad de impacto.

Las condiciones de prueba utilizados en la geometría GA son los mismos que los utilizados en la FA Geometría de la norma ASTM D 5628. Las condiciones de prueba de la geometría GB equivalen a la geometría utilizada para la prueba de impacto Gardner Variable Altura. Las condiciones de prueba de la geometría GC causar un tipo de corte golpe de fallo, ya que el agujero de la placa de apoyo está cerca del diámetro del delantero. Las condiciones de prueba de la geometría GD son los mismos que los de la norma ASTM D 3763. Las condiciones de prueba de la geometría de GE son los mismos que los de la norma ASTM D 4226, la configuración del impactador cabeza H.25. Debido a la naturaleza de las pruebas

de impacto, la selección de un método de prueba y el delantero debe ser algo arbitrario. Considerar el medio ambiente de uso final y los requisitos de la elección de las geometrías delantero disponible. Sin embargo, la selección de cualquiera de las geometrías delantero está permitido, después de dicho examen. El procesamiento del material puede tener un efecto significativo en el desarrollo de las propiedades físicas de una de plástico. Consulte las normas pertinentes de las directrices de procesamiento de materiales.

## 2.11 POLIMEROS DE INYECCION

2.11.1 Polipropileno (PP). Termoplástico comercial, semicristalinos, blanco semiopaco elaborado en una amplia variedad de calidades y modificaciones. Es una poliolefina lineal que puede compararse en varios modos con el polietileno de alta densidad y de fabricación similar. Los catalizadores utilizados controlan la estere regularidad de tal manera que los polipropilenos comerciales suelen ser isotácticos de modo predominante.

El homopolímero polipropileno tiene una dureza y una resistencia térmica superiores a las del polietileno de alta densidad, pero una resistencia al impacto inferior y se vuelve quebradizo por debajo de 0°C. Por lo tanto, las calidades copoliméricas son preferidas para aplicaciones que exponen a condiciones de frío/invierno. Estos polímeros tienen una mejor resistencia al impacto.

El polipropileno como los polietilenos tiene una buena resistencia química pero una resistencia débil a los rayos UV (salvo estabilización o protección previa).<sup>1</sup>

2.11.2 Poliestireno (PS). Homopolímero Poliestireno conocido como Poliestireno "cristal". Es un termoplástico comercial amorfo, transparente e incoloro, rígido, relativamente duro y quebradizo.

Tiene buenas propiedades eléctricas, una excelente resistencia a la radiación gamma y puede ser esterilizado por rayos X, sin embargo, su resistencia química y a los rayos UV es débil. Modificado por incorporación de elastómeros, se vuelve Poliestireno de (alto) impacto opaco.<sup>2</sup>

2.11.3 Polietileno de alta densidad (HDPE). Termoplástico comercial semicristalino (un 70-80% típicamente) blanquecino, semiopaco con propiedades similares a las del LDPE, pero mucho más sólido y rígido con una resistencia química superior.

Su resistencia al impacto es bastante alta y se mantiene a temperaturas bajas, aunque la de la LDPE es mucho más alta.

---

<sup>1</sup> <http://ideplas.com/ficha-tecnica-lamina-de-polipropileno.pdf>

<sup>2</sup> [http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/Plasticos/Ficheros/FT\\_2\\_0.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/Plasticos/Ficheros/FT_2_0.pdf)

Sus propiedades eléctricas, particularmente en frecuencias elevadas son muy buenas pero las del LDPE son aún mejores.<sup>3</sup>

2.11.4 Polietileno de baja densidad (LDPE). Termoplástico comercial, semicristalino (un 50% típicamente), blanquecino, blando, flexible y tenaz incluso a temperaturas bajas, con excelentes propiedades eléctricas pero una resistencia a las temperaturas débil. Su resistencia química también es muy buena, pero es propenso al agrietamiento bajo carga ambiental, su resistencia a los rayos UV es mediocre y tiene propiedades de protección débiles, salvo con el agua.<sup>4</sup>

2.11.5 Poliamida 66 Nylon 66 (PA66). Termoplástico industrial semicristalino, blanquecino. Es el nylon alifático no reforzado más duro y más resistente a la abrasión con una mejor tenacidad a temperaturas bajas que el nylon 6 o el acetal. Su viscosidad de fundido muy baja puede acarrear dificultades en la transformación industrial y su exposición a la intemperie puede causar una fragilización y un cambio de color salvo estabilización o protección previa. Está disponible con una amplia gama de cargas, especialmente fibra de vidrio que proporciona un incremento importante de la rigidez. Calidades súper duras con propiedades de impacto y de sensibilidad a la entalla que se sitúan entre las mejores de todos los termoplásticos industriales también están disponibles.<sup>5</sup>

En el **Anexo A** se encontrarán las fichas técnicas de los materiales polímeros de inyección.

## 2.12 MATERIALES DE FABRICACIÓN DE MOLDES DE INYECCIÓN.

Para realizar el mecanizado de los componentes del molde se requieren diferentes tipos de acero, para esta selección se tienen en cuenta los criterios de funcionabilidad del material dentro del molde, contacto metal-metal, contacto metal-polímero, y contornos del molde.

2.12.1 Aceros para herramientas. En este grupo se incluyen teóricamente todos los aceros que pueden emplearse para la fabricación de herramientas. Sin embargo, en la práctica, la aplicación de este término queda limitada a los aceros

---

<sup>3</sup> <http://catalog.ides.com/docselect.aspx?l=18568&E=100107&DOC=DOWTDS&DS=123&DK=STD&DC=es>

<sup>4</sup> <http://www.ptq.pemex.com.mx/productosyservicios/eventosdescargas/Documents/Hojas%20de%20Seguridad/Hojas%20de%20Seguridad/POLIETILENO%20ALTA%20DENSIDAD.pdf>

<sup>5</sup> [http://www.lorkindustrias.com/downloads/fichastecnicas/fichaTecnicaPA6\\_6.pdf](http://www.lorkindustrias.com/downloads/fichastecnicas/fichaTecnicaPA6_6.pdf)

especiales de gran calidad utilizados en la fabricación de utillajes o herramientas destinados a trabajar los materiales por corte o por presión.

2.12.2 Propiedades de los aceros para herramientas. En esta sección se plasmarán las propiedades de los aceros que serán utilizados para la construcción del molde, estas propiedades son contempladas para el

**Tenacidad.** En el caso de los aceros de herramientas, el término tenacidad se refiere más a la capacidad de sufrir golpes sin rotura que a la facultad de absorber energía durante la deformación. La mayor parte de las herramientas tienen que ser piezas rígidas, y por lo general cualquier deformación que presenten, por pequeña que sea, las hace inservibles. Los aceros de herramientas con contenidos en carbono medios y bajos, pertenecientes a los grupos S y H, son los que presentan mejor tenacidad y constituyen el material utilizado en la fabricación de herramientas resistentes al choque.

**Dureza en caliente.** Esta propiedad expresa la resistencia que presenta el acero al ablandamiento a temperaturas elevadas, y viene reflejada, en cierto modo, por la resistencia que ofrece el material al revenido, la cual constituye un factor importante a considerar en la elección de los aceros de herramientas que trabajen a más de 500°C es fundamental que posean aleación, formadores de carburos duros y estables, mejora generalmente la resistencia la ablandamiento a temperaturas elevadas, destacando en este sentido los aceros que contienen grandes cantidades de tungsteno, cromo y molibdeno.

**Maquinabilidad.** Esta propiedad indica la mayor o menor facilidad que presenta el material a su mecanización y a la obtención de un acabado perfecto. Los factores que influyen en la maquinabilidad de los aceros de herramientas son la dureza en estado de recocido, la microestructura del acero y la cantidad de carburos presentes. En comparación con los aceros aleados normales, los aceros de herramientas son mucho más difíciles de mecanizar. El acero de herramienta que presenta mejor maquinabilidad (el tipo W) tiene un índice aproximadamente igual al 30%, por lo tanto, como referencia para comparar la maquinabilidad de los distintos aceros de herramientas se toma W, a los que se asigna arbitrariamente el índice 100. La maquinabilidad y facilidad de trabajo de los aceros de herramientas disminuye al aumentar el contenido de carbón y elementos de aleados. Conforme aumenta el contenido en carbono y elementos de aleación en los aceros, carbono en combinación con elementos que tienen gran tendencia a formar carburos, como el vanadio, el tungsteno, el cromo y el molibdeno, reduce la maquinabilidad al

formarse gran número de partículas duras de carburo, que no se disuelven en el recocido.

**Resistencia a la descarburación.** Ya que ésta determina la instalación a utilizar en el tratamiento térmico, y la cantidad de material que es necesario quitar de la superficie después del temple. La descarburación tiene lugar normalmente cuando los aceros se calientan a temperaturas superiores a 704°C t salvo que el material se proteja en el calentamiento por algún procedimiento, como, por ejemplo, mediante la utilización de una atmósfera protectora, es probable que la superficie del acero pierda algo de carbono. Esta descarburación es la causa de que en el temple la superficie no se endurezca, sino que quede blanda. Los aceros de herramientas al carbono son los que menos se descarburan. Los aceros para la fabricación de herramientas para trabajos de choque presentan una resistencia a la descarburación baja; los utilizados en las herramientas para trabajos en caliente se consideran que tienen una resistencia mediana, y la mayoría de los restantes aceros de herramientas ofrecen una resistencia a la descarburación buena.

**Tratamiento térmico de los aceros de herramientas.** El calentamiento de estos aceros debe realizarse efectuando el calentamiento lentamente. O bien precalentando el material a una temperatura más baja antes de introducirlo en un horno a elevadas temperaturas. A veces se colocan las piezas a tratar en un horno frío, calentándose simultáneamente el horno y las piezas hasta alcanzar la temperatura requerida. En cualquier caso, es importante que la pieza permanezca a la temperatura adecuada el tiempo necesario para que se caliente uniformemente toda su masa. Debe procurarse no calentar el acero de herramientas a temperaturas demasiado altas ni mantenerlo a temperatura demasiado tiempo para evitar los sobrecalentamientos. El procedimiento y los medios de temple utilizados varían según el tipo de acero a tratar y la velocidad de enfriamiento requerida, los aceros al carbono y de baja aleación se templean en salmuera o agua, y los aceros de alta aleación en aceite, aire o sales fundidas. Es conveniente efectuar el revenido de los aceros de herramientas inmediatamente después de templearlos y antes de que se hayan enfriado a la temperatura ambiente, para reducir al mínimo el peligro de formación de grietas, debidas a las tensiones originadas en el temple.

2.12.3 Acero para de contacto (metal-metal). Acero SAE 4140. Es un acero medio carbono aleado con cromo y molibdeno de alta templabilidad y buena resistencia a la fatiga, abrasión e impacto. Este acero puede ser nitrurado para darle mayor



resistencia a la abrasión. Es susceptible al endurecimiento por tratamiento térmico. Tipo: Acero de baja aleación al cromo-molibdeno.<sup>6</sup>

Características: El 4140 es uno de los aceros de baja aleación más populares por el espectro amplio de propiedades útiles en piezas que se someten a esfuerzo, con relación a su bajo costo. Al templearlo se logra muy buena dureza con una gran penetración de la misma, teniendo además un comportamiento muy homogéneo. Tiene también una buena resistencia al desgaste.

Aplicaciones: Se emplea en cigüeñales, engranes, ejes, mesas rotatorias, válvulas y ruedas dentadas. También es utilizado en piezas forjadas, como herramienta, llaves de mano y destornilladores, espárragos, árboles de levas, flechas de mecanismos hidráulicos, etc.

2.12.4 Acero para contacto con material fundido. Acero SAE P-20. El acero P20, conocido también como SISA P20, es pre-templado es de uso general para la fabricación de moldes. Su uso es para el electro-erosionado y maquinado de moldes de plástico y componentes para la fundición de zinc.

Aplicaciones: Comúnmente es utilizado para el moldeo por compresión, como porta moldes y piezas de apoyo, piezas para la construcción de maquinaria y útiles en su general, moldes para la inyección de plástico, herramientas para la fundición de presión de Zinc y moldeos en dos fases.<sup>7</sup>

2.12.5 Acero para contorno. Acero SAE 1045. Es un acero utilizado cuando la resistencia y dureza son necesarias en condición de suministro. Este acero medio carbono puede ser forjado con martillo. Responde al tratamiento térmico y al endurecimiento por llama o inducción, pero no es recomendado para cementación o cianurado. Cuando se hacen prácticas de soldadura adecuadas, presenta soldabilidad adecuada. Por su dureza y tenacidad es adecuado para la fabricación de componentes de maquinaria. Tipo: Acero de medio contenido de carbón.

Aplicaciones: Por sus características de temple, se tiene una amplia gama de aplicaciones automotrices y de maquinaria en general, en la elaboración de piezas como ejes y semiejes, cigüeñales, etc. de resistencia media.

---

<sup>6</sup> <http://www.sisa1.com.mx/pdf/Acero%20SISA%204140R.pdf>

<sup>7</sup> [http://www.thyssenkrupp.cl/archivos/TK\\_-\\_2738.pdf](http://www.thyssenkrupp.cl/archivos/TK_-_2738.pdf)

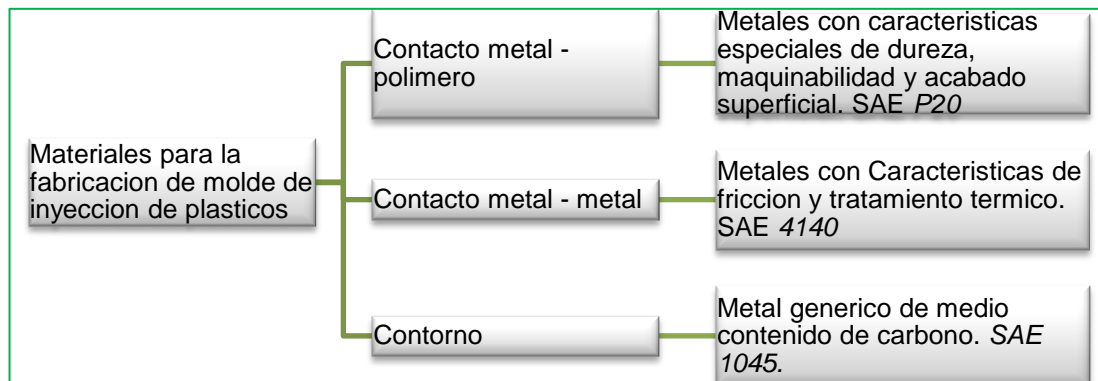


El acero para utillajes en los tipos de acero de alta aleación, intencionados en principio, para propósitos tales como moldeo de plástico, corte y estampación, fundición inyectada, extrusión, forja, trabajo de la madera.

Normalmente el acero para utillajes se suministra en estado recocido blando. Ello es así porque de éste modo, el material es más fácil de mecanizar con herramientas de corte y darle, además, una microestructura adecuada para el temple. En el mercado hay una gran gama de materiales para la fabricación de moldes.<sup>8</sup>

En la Figura 11, se muestra el mapa conceptual hace referencia a los materiales más comunes usados en la construcción de moldes para inyección de plásticos.

Figura 11. Mapa conceptual materiales para fabricación de moldes



Fuente. Autor

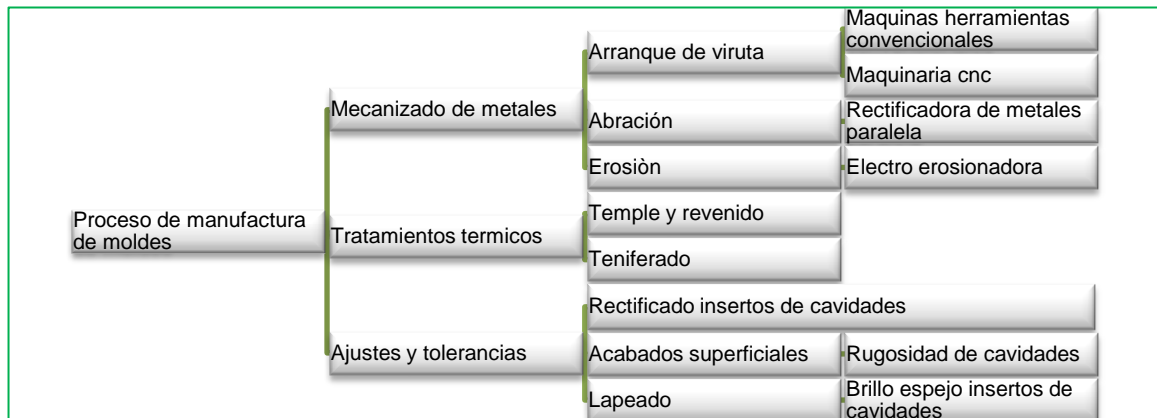
## 2.13 PROCESO DE MANUFACTURA DE MOLDES.

Un proceso de fabricación, es un conjunto de actividades individuales y grupales para la obtención de un producto terminado. Para la fabricación de un molde se inicia desde la obtención de la materia prima “acero de diferentes denominaciones”, el mecanizado de dicha materia prima, el ensamble y ajuste de los componentes mecanizados hasta la obtención de una herramienta funcional.

La Figura 12 da un punto de partida de las operaciones individuales que se realizan de forma sistemática para la fabricación de un molde de inyección de plásticos.

<sup>8</sup> [http://www.acerosindustriales.com/sitio/images/stories/pdfs/Fichas/ACERO\\_DE\\_MEDIO\\_CARBONO\\_SAE\\_1045.pdf](http://www.acerosindustriales.com/sitio/images/stories/pdfs/Fichas/ACERO_DE_MEDIO_CARBONO_SAE_1045.pdf)

Figura 12. Proceso de manufactura de moldes



Fuente. Autor

**Mecanizado por arranque de viruta:** El material es arrancado o cortado con una herramienta dando lugar a un desperdicio o viruta.

**Torneado:** El torneado consiste en los mecanizados que se realizan en los ejes de revolución u otros componentes que tengan mecanizados cilíndricos concéntricos o perpendiculares a un eje de rotación tanto exteriores como interiores.

**Fresado:** El fresado consiste principalmente en el corte del material que se mecaniza con una herramienta rotativa de varios filos, que se llaman dientes, labios o plaquitas de metal duro, que ejecuta movimientos de avance programados de la mesa de trabajo en casi cualquier dirección de los tres ejes posibles en los que se puede desplazar la mesa donde va fijada la pieza que se mecaniza.

**Mecanizado CNC:** El mecanizado CNC es un proceso automatizado de las operaciones convencionales de las maquinas herramientas, consiste la programación de la máquina de acuerdo con la modelación de la parte y las herramientas a utilizar creando las rutas de operación y generando un código de lectura universal para la máquina.

**Mecanizado por abrasión:** La abrasión es la eliminación de material desgastando la pieza en pequeñas cantidades. Este proceso se realiza por la acción de una herramienta característica, la muela abrasiva. En este caso, la herramienta (muela) está formada por partículas de material abrasivo muy duro unidas por un aglutinante.

**Rectificado:** Mecanizado de precisión tanto en dimensiones como en acabado superficial, a veces a una operación de rectificado le siguen otras de pulido y lapeado.

**Tratamiento térmico:** Se conoce como tratamiento térmico el proceso al que se someten los metales con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, la dureza, la resistencia y la elasticidad. Los tratamientos térmicos para componentes de moldes son:

**Temple y Revenido:** Este tratamiento térmico consiste en el endurecimiento del metal, llevando la pieza hasta una determinada temperatura durante un tiempo establecido, luego del calentamiento, se enfría en agua o aceite. Este proceso hace que la pieza quede dura y al mismo tiempo frágil, para contrarrestar la fragilidad y aliviar las tensiones del material se realiza un revenido, que consiste en calentar la pieza hasta una temperatura y dejar enfriar.

**Teniferado:** Proceso de endurecimiento superficial por medio de una difusión de nitrógeno en la superficie del acero. El proceso es empleado para aceros de construcción y de herramientas. Las piezas contienen una fina capa, pero suficiente a la resistencia, al desgaste, a la oxidación, así como valores altos de resistencia a la fatiga, dureza superficial y de mínimas deformaciones en ellas.

**Ajustes y Tolerancias de moldes:** La tolerancia es una definición propia de la metrología industrial, que se aplica a la fabricación de piezas en serie. Dada una magnitud significativa y cuantificable propia de un producto industrial, sea alguna de sus dimensiones, resistencia, peso o cualquier otra especificación. El margen de tolerancia es el intervalo de valores en el que debe encontrarse dicha magnitud para que se acepte como válida, lo que determina la aceptación o el rechazo de los componentes fabricados según sus valores queden dentro o fuera de ese intervalo.

**Acabado superficial:** Para obtener un óptimo acabado de las piezas procedentes de las operaciones de rectificado se emplean máquinas pulidoras que trabajan por aplicación de la pieza a una superficie abrasiva móvil, normalmente giratoria. El material arrancado en el pulido es prácticamente nulo y apenas modifica las dimensiones del rectificado. Utilizando la gama de abrasivos para un acabado brillo espejo de las cavidades del molde.

**Lapeado:** Es el proceso de acabado de una superficie por abrasión muy fina, con objeto de conseguir mucha precisión en el acabado superficial, conocida como rugosidad.

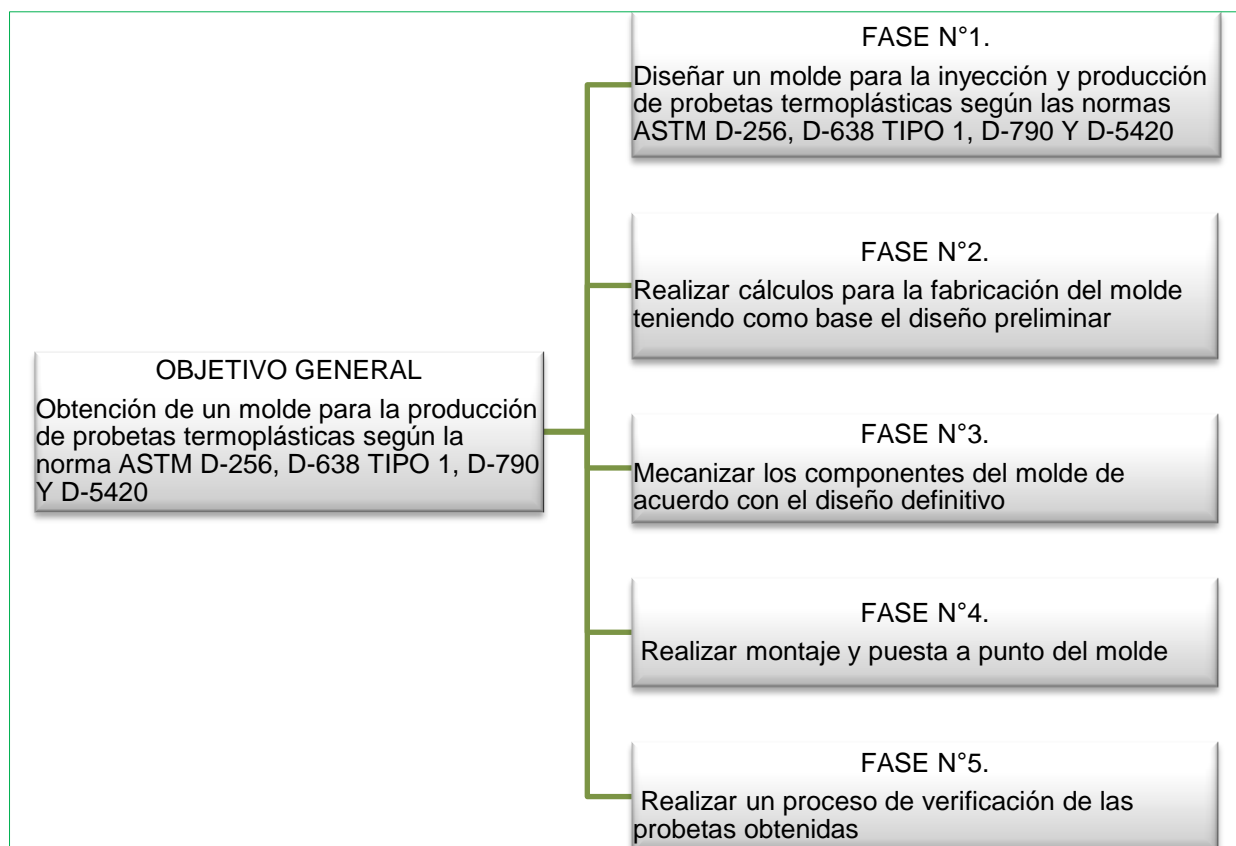
## CAPÍTULO 3. DISEÑO METODOLÓGICO

### 3.1 DIAGRAMA DE DISEÑO METODOLÓGICO

El diagrama metodológico que se plantea para el desarrollo de esta monografía es creado en base de las actividades relacionadas con cumplimiento del objetivo General y los objetivos Específicos.

Iniciando con el objetivo general, que es la fabricación de un molde para la producción de probetas termoplásticas se definen los objetivos específicos y se da inicio al proceso de investigación y fabricación del molde.

Figura 13. Matriz de implementación de tesis



Fuente. Autor.

Fase N°1. Define los parámetros de la fabricación del molde, donde se toman las referencias de las normas de las probetas a inyectar, el diseño preliminar del molde de acuerdo con el cálculo de las cantidades de especímenes por placa, y los materiales polímero de inyección.

Al iniciar el proceso, se plantean los requerimientos del cliente, el docente plantea que sea un molde multipropósitos, donde se puedan inyectar cuatro (4) diferentes especímenes de normas para los ensayos de materiales polímeros, y donde se puedan inyectar cinco diferentes polímeros; teniendo la limitación del flujo del polímero, estableciendo que el flujo debe ser laminar y no debe haber concentradores de esfuerzo en el espécimen inyectado.

Se plantean cuatro (4) normas de pruebas de plásticos, la norma de impacto Izod ASTM D-256, la norma de tensión ASTM D-638 T1, la norma de flexión ASTM D-790 y la norma de impacto Gardner ASTM D-5420, donde se estudian las características de cada espécimen, dimensiones máximas, mínimas y nominales, las tolerancias dimensionales de cada espécimen según cada norma.

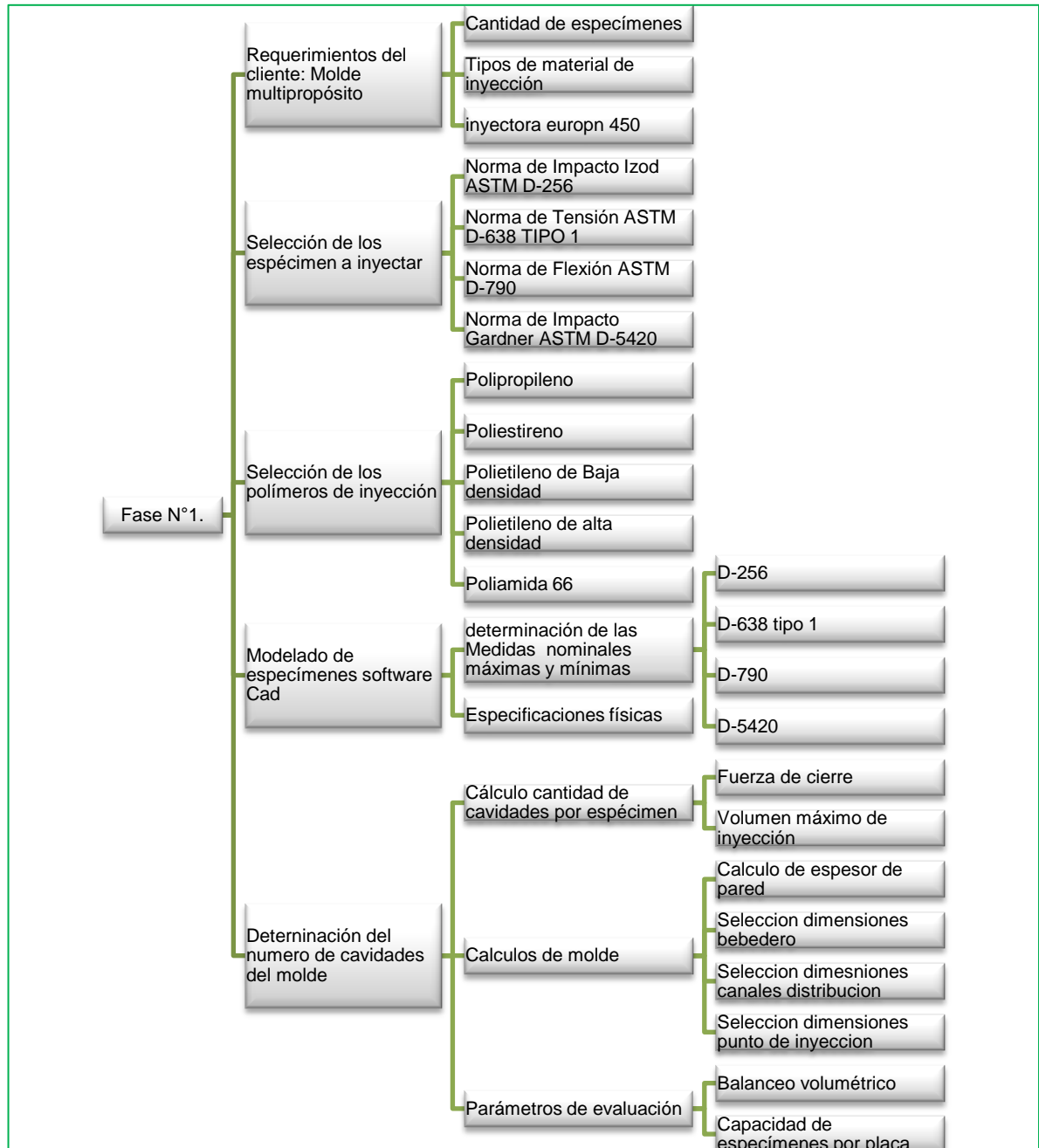
Una vez definidas las normas y establecidos los parámetros de cada espécimen según cada norma, se procede a seleccionar los polímeros de inyección, es con el fin de tener las propiedades del polímero tales como la densidad, para realizar los modelos geométricos de cada espécimen con el respectivo polímero.

Seguido se realizan los cálculos de las cavidades de los especímenes que se pueden colocar en la placa de insertos por cada norma, donde es necesario definir qué tipo de máquina de inyección se usara, para realizar los cálculos del molde de acuerdo con las características de la maquina (fuerza de cierre, capacidad de inyección y dimensiones entre columnas).

Definiendo la cantidad de espécimen por placa, y realizando la evaluación de los factores de mayor relevancia para la inyección tales como balanceo volumétrico, se procede a realizar los cálculos y selección de los componentes del molde, cálculo de espesor de pared de la placa de insertos, selección de diámetros de canales de alimentación primarios y secundarios de acuerdo con el peso de cada espécimen. Se realizan un análisis por medio de elementos finitos, este proceso se realiza con condiciones de fuerza máxima de cierre de la máquina de inyección, este análisis obedece a tener un parámetro de evaluación y corroboración de los cálculos inicialmente realizados para el desarrollo del molde, (espesor de pared de placa de insertos) donde se analizan los posibles fallos que el molde pueda tener

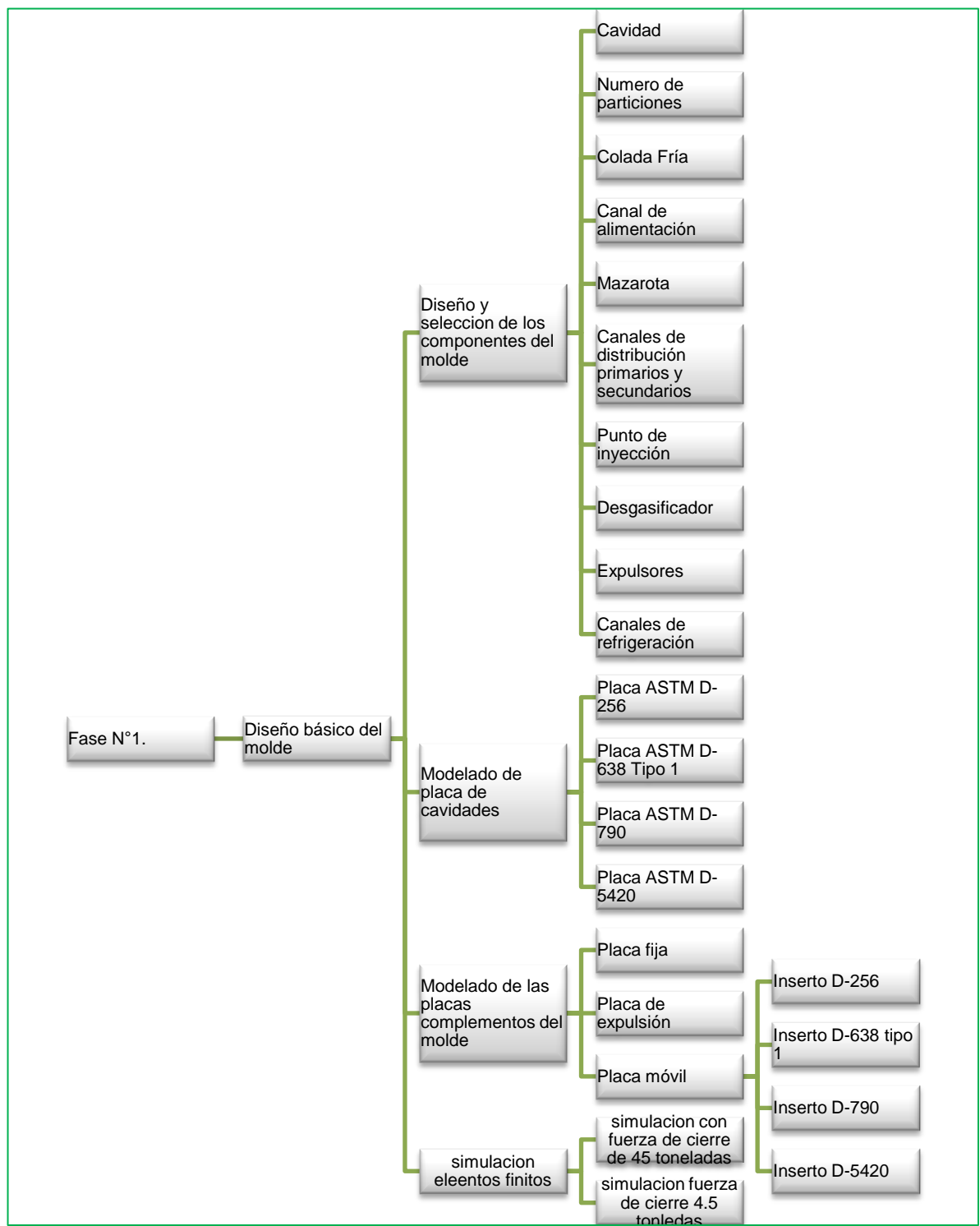
en proceso de inyección, y cuáles son las zonas de mayor afectación, y cuál es la actividad que se debe realizar para disminuir estos esfuerzo. Una vez establecido este proceso se tiene el diseño preliminar del molde, donde se encuentran todos los componentes modelados y ensamblados con la herramienta software CAD.

Figura 14. Matriz fase 1. Sección 1



Fuente. Autor

Figura 15. Matriz fase 1. Sección 2



Fuente. Autor

Fase N°2. Define los parámetros del molde, utilizando el proceso de simulación de inyección, con el cual se determinan las dimensiones finales de las cavidades de la palca de inyección del molde, definiendo los materiales para la fabricación del molde y emitiendo los planos de fabricación del mismo.

En la fase número 2, se inicia realizando cálculos de tiempo de inyección, tiempo de solidificación y tiempo total de ciclo, eso con el fin de tener una base de análisis y comparación con respecto a la simulación del software CAE.

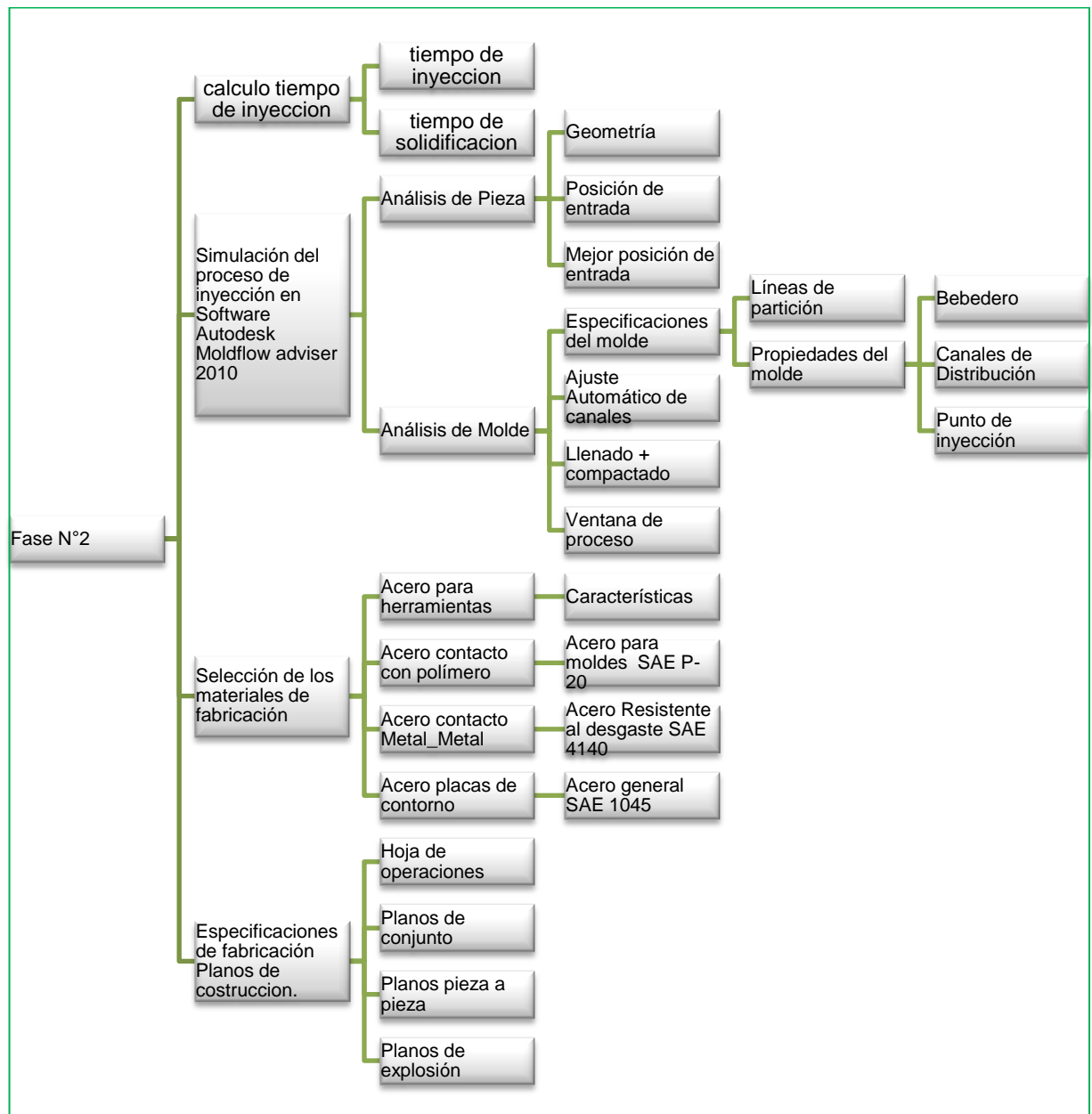
se realiza el proceso de simulación de inyección con la herramienta CAE, esta simulación establece parámetros de inyección y es necesario tener la claridad de las capacidades de inyección de la máquina, presión de inyección, tabulando estos datos se establecen una serie de análisis de pieza individual que establece si es viable o no el modelo de la pieza. Análisis de molde con el número de piezas seleccionada por placa donde tiene dos factores que son, el análisis del llenado de la pieza en el molde que establece parámetros de tiempo de inyección, temperatura y orientación de flujo, los de mayor importancia y el análisis de compactado de la pieza en molde donde establece parámetros de contracción volumétrica y tiempo de solidificación de la pieza. Con esto resultados, se procede a realizar ajustes dimensionales de las cavidades del molde, validando el incremento de volumen de las piezas con respecto a la contracción volumétrica de cada material en referencian a cada espécimen de cada norma.

En este proceso es necesario realizar la selección de los materiales de construcción del molde, determinar el material con el cual se construirá cada parte del molde, para este molde se determinan tres tipos de material. Acero de contacto con el polímero con características de materiales para herramientas. Acero de contacto con acero con especificaciones de fricción y acero de construcción.

Con estos parámetros establecidos, se realizan los planos de construcción, donde se establecen las características constructivas de cada componente del molde, dimensiones totales, acabados superficiales, tolerancias, tipos de material, tratamientos térmicos y cantidades de piezas. En esta sección del proceso se establece el diseño final del molde



Figura 16. Matriz fase 2



Fuente. Autor

Fase N°3. Define la fabricación del molde desde la obtención del material hasta la construcción total acorde al diseño final, usando maquinas herramientas convencionales y centro de mecanizado CNC para la fabricación de las placas de

las cavidades del molde, los métodos convencionales para la obtención final del molde.

En la sección 1 de la fase 3. Fabricación del molde, se establecen parámetros básicos, obtención de materiales, y maquinado convencional, este proceso se refiere a la obtención de los materiales en bruto las, diferentes geometrías, cantidades y tipos de materiales para fabricar el conjunto de piezas del molde.

Figura 17. Matriz fase 3. Sección 1



Fuente. Autor

En la sección 2 de la fase 3. Fabricación del molde, se establecen los parámetros de simulación de mecanizado para centro de mecanizado CNC.

La primera operación es el traslado del modelo virtual desde el software CAD a el software CAM, donde se debe realizar el ajuste primario de las condiciones de operación de la pieza la cual se mecanizará.

De acuerdo con las geometrías de las piezas a mecanizar, cada una de ellas requiere de un tipo de mecanizado, tales como taladrado, mecanizado de contorno de desbaste y de acabado, mecanizado de sección, etc. y para cada uno de los

mecanizados a realizar se requiere de una herramienta con características especiales para el mecanizado específico.

Una vez seleccionadas las herramientas para cada mecanizado de acuerdo con las geometrías finales requeridas por la pieza, se establecen de acuerdo a los cálculos los parámetros de mecanizado, la velocidad de giro de la herramienta, la velocidad de avance de la herramienta y la profundidad por pasada de la herramienta, se procede a establecer los tipos de mecanizado por cada operación de la pieza requerida, tales como facing, contorno etc.

Una vez realizados estos pasos, se procede a generar el código de interface entre el software y el centro de mecanizado, este código se inserta en la máquina para ser leído y ejecutado.

En la sección tres (3) fase tres (3). Fabricación de molde. se establecen las condiciones de la pieza, la ubicación en la mesa del centro de mecanizado, el punto cero de inicio de la pieza con respecto a la máquina centro de mecanizado.

Seguido de este proceso se establece las condiciones de cada herramienta, la altura y compensación de altura con respecto al punto de inicio de la operación.

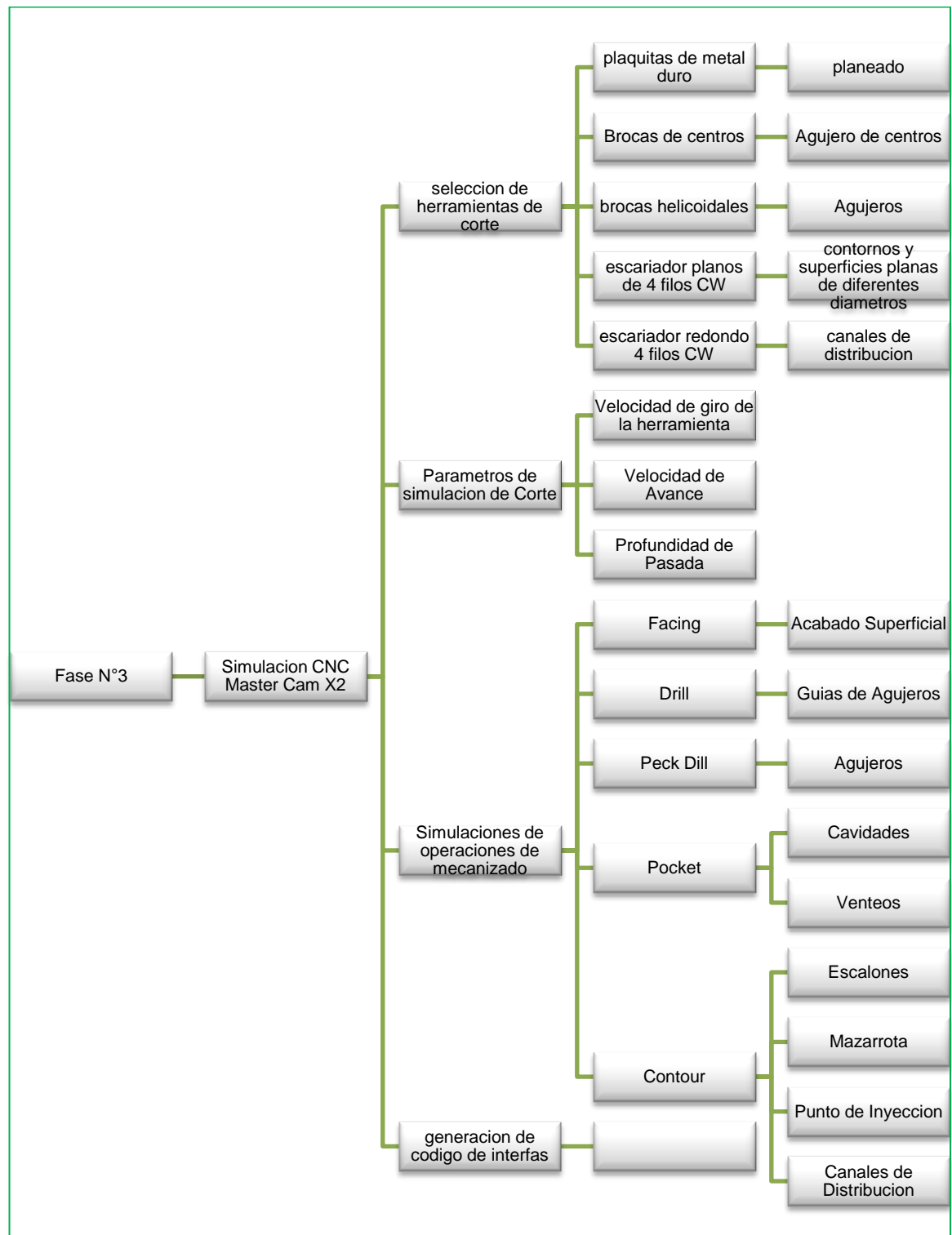
Se realiza el proceso de ejecución de operación de mecanizado en el centro de mecanizado. Iniciando con la instalación y posicionamiento de las herramientas en magazine de herramientas, de acuerdo con la numeración establecida en la simulación de las operaciones de mecanizado con el Software Master Cam X2. Se realiza la simulación en vacío, para verificar que no hay obstáculos durante el recorrido de la herramienta. Este proceso sirve para la validación de la compatibilidad del programa y la ejecución en la máquina centro de mecanizado. Se establece una hoja y/o ruta de operaciones mecánicas para cada pieza.

Luego de verificar se procede a ejecutar el programa bajo condiciones de operación establecidas por la máquina.

Después de mecanizar las piezas, y de acuerdo con el diseño de cada una de ellas, se procede a verificar con respecto a planos la calidad de la pieza, donde en plano exige una serie de características preestablecidas de cantidad y acabado superficial, dureza donde es necesaria realizar un tratamiento térmico de acuerdo a la ficha técnica y recomendaciones del fabricante del material.

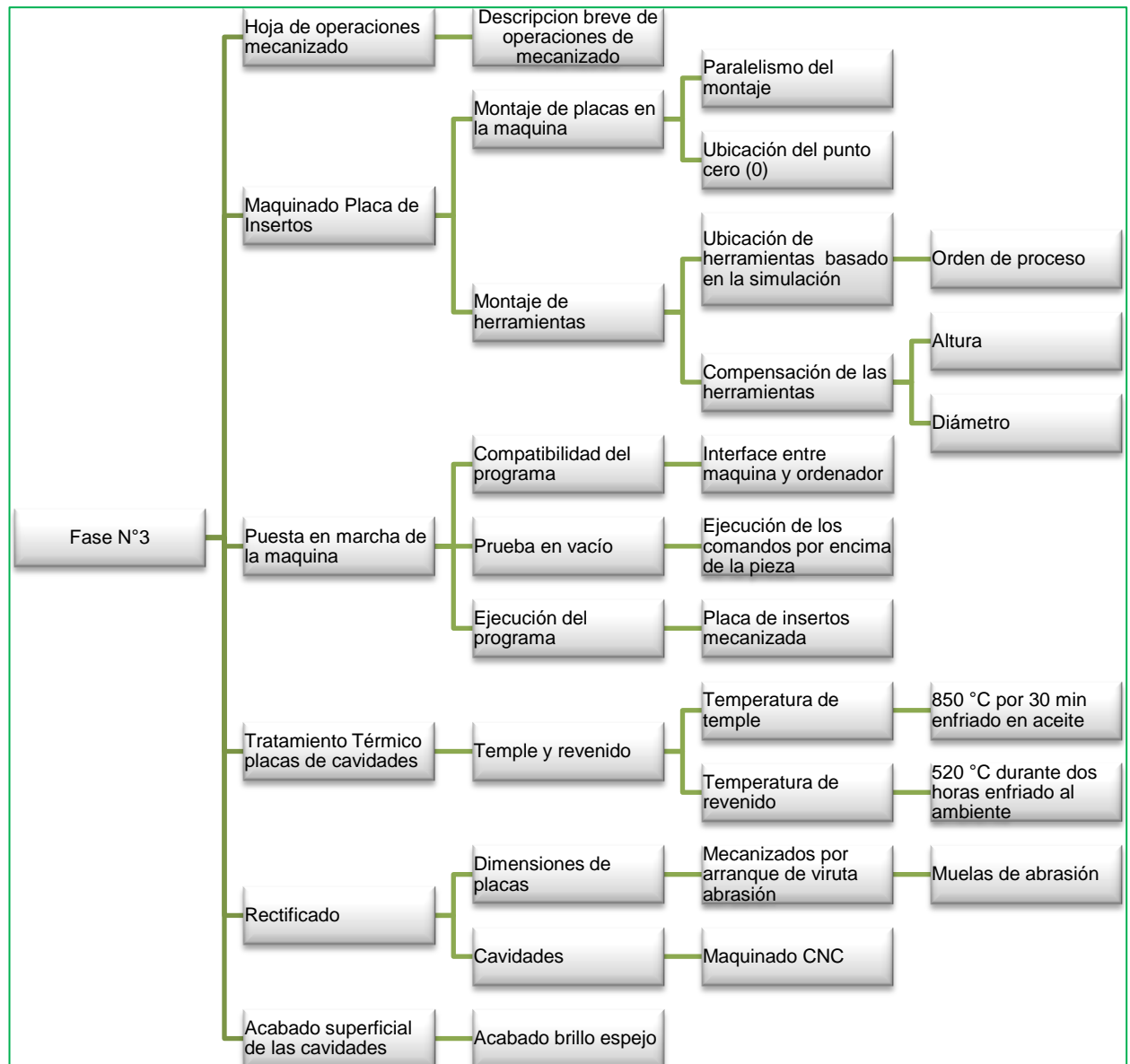
Por último, se trabaja en el acabado superficial de cada pieza, ajustándola a las especificaciones requeridas en los planos de fabricación.

Figura 18. Matriz fase 3. Sección 2



Fuente. Autor

Figura 19. Matriz Fase 3. Sección 3

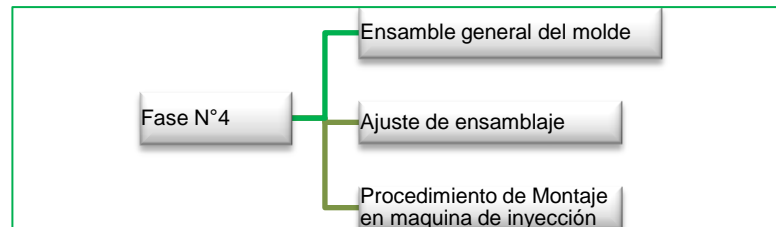


Fuente. Autor

Fase N°4. Define la puesta a punto del molde, que consta del ajuste mecánico del molde y el ensamble general del mismo. En el ajuste mecánico del molde, se establece que estas operaciones deben ser ejecutadas por personal calificado, es decir una persona con la habilidad de realizar los ajustes del molde, implica el armado y el deslizamiento entre las columnas de la placa móvil y los bujes de la placa fija del molde. Una vez realizado el ajuste manual de molde se procede a realizar la puesta a punto de molde, pruebas de funcionamiento en vacío, lo

referente al procedimiento de montaje del molde en la maquina inyectora. Los movimientos de cierre y apertura de molde en la prensa, bajo condiciones de fuerza de cierre máximo permitido en el molde.

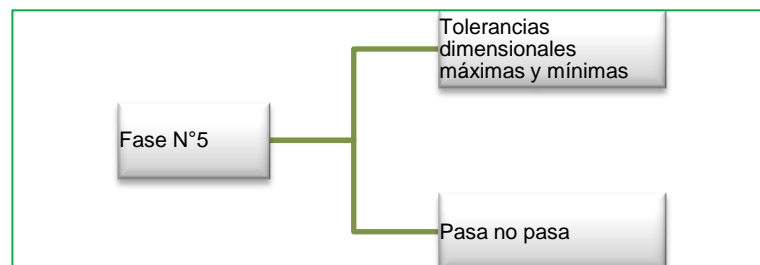
Figura 20. Matriz fase 4



Fuente. Autor

Fase N°5. Define las pruebas de funcionamiento del molde en la máquina de inyección, donde se verifica las probetas inyectadas cumplan con las especificaciones de las normas acorde a las cuales se tomaron como referencia para la construcción del molde. También se establecen las condiciones de operación del molde, fuerza máxima de cierre, perfiles de temperatura de tornillo de inyección, capacidad de inyección, y tiempos de inyección, estos parámetros están preestablecidos por el análisis realizado con el software CAE (Moldflow Adviser)

Figura 21. Matriz Fase 5



Fuente. Autor

## CAPÍTULO 4. HERRAMIENTAS ESPECÍFICAS.

Para el desarrollo de este proyecto se requirió el uso de tres (3) software que se implementan en la ingeniería de productos, basados en la tendencia de mejoramiento continuo. También fue de gran utilidad el conocimiento teórico y práctico de normas de plásticos, inyección de plásticos, mecanizado en maquinaria convencional y centros de mecanizado CNC.

Con el software, **CAD** (computer – aided - design), se realizarán los modelos geométrico tridimensional del producto, y los demás componentes que se requieren fabricar para el conjunto final del molde.

Con el software, **CAE** (Computer – Aided - Engineering), se realizará la simulación del proceso de inyección del producto, para este caso específico las probetas de las normas ASTM D-256, D-638 T1, D-790 y D-5420, el resultado de esta simulación, indica que paso se debe seguir. Ajuste de tolerancias dimensionales de las placas de insertos del molde.

Con el software **CAM** (computer – aided - manufacturing), se realizará el programa de mecanizado de las diferentes partes del conjunto, donde el enfoque de este proceso es para la construcción de la herramienta.

#### 4.1 SOFTWARE CAD AUTODESK INVENTOR 2011.[16]

El diseño asistido por computadora u ordenador, más conocido por sus siglas inglesas CAD (computer – aided - design).

Estas herramientas se pueden dividir básicamente en programas de dibujo en dos dimensiones (2D) y modeladores en tres dimensiones (3D).

El proceso de diseño en CAD consiste en cuatro (4) etapas. **Etapas 1:** Modelado geométrico, Se describe como forma matemática o analítica a un objeto físico. **Etapas 2:** Análisis y optimización del diseño, Después de haber determinado las propiedades geométricas, se somete a un análisis ingenieril donde podemos analizar las propiedades físicas del modelo. **Etapas 3:** Revisión y evaluación del diseño, En esta etapa importante se comprueba si existe alguna interferencia entre los diversos componentes. **Etapas 4:** Documentación y dibujo (drafting). Por último, en esta etapa se realizan planos de detalle y de trabajo.

En la Figura 22, se observa el entorno grafico del software Auto desk Inventor, la imagen muestra el entorno virtual en el cual se pueden realizar los modelos y los planos de cualquier proyecto, este entorno grafico es amigable al usuario final.

Figura 22. Entorno grafico Autodesk Inventor 2011



Fuente. [16]

#### 4.2. SOFTWARE CAE (AUTODESK MOLD FLOW ADVISER 2010)

Ingeniería asistida por computadora o por ordenador (CAE, del inglés Computer – Aided - Engineering).

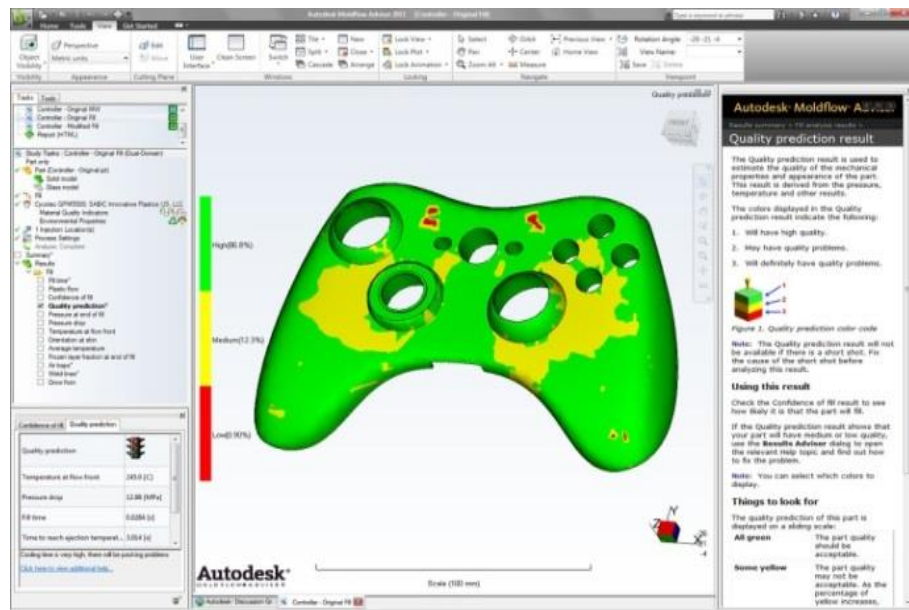
Es el conjunto de programas informáticos que permiten analizar y simular los diseños de ingeniería realizados con el ordenador, o creados de otro modo e introducidos en el ordenador, para valorar sus características, propiedades, viabilidad y rentabilidad, su finalidad es optimizar su desarrollo y consecuentes costos de fabricación y reducir al máximo las pruebas para la obtención del producto deseado.

La mayoría de ellas se presentan como módulos o extensiones de aplicaciones CAD, que incorporan: Análisis cinemático, Análisis por el método de elementos finitos (FEM, Finite Elements Method).

La Figura 23, se ilustra el entorno grafico del software, la importación del elemento al cual se le realizara el análisis, y la Figura 24, muestra el resultado obtenido después del análisis con el software, donde dependiendo del análisis realizado los colores y sus valores tienen una importancia relevante en el análisis de la pieza.

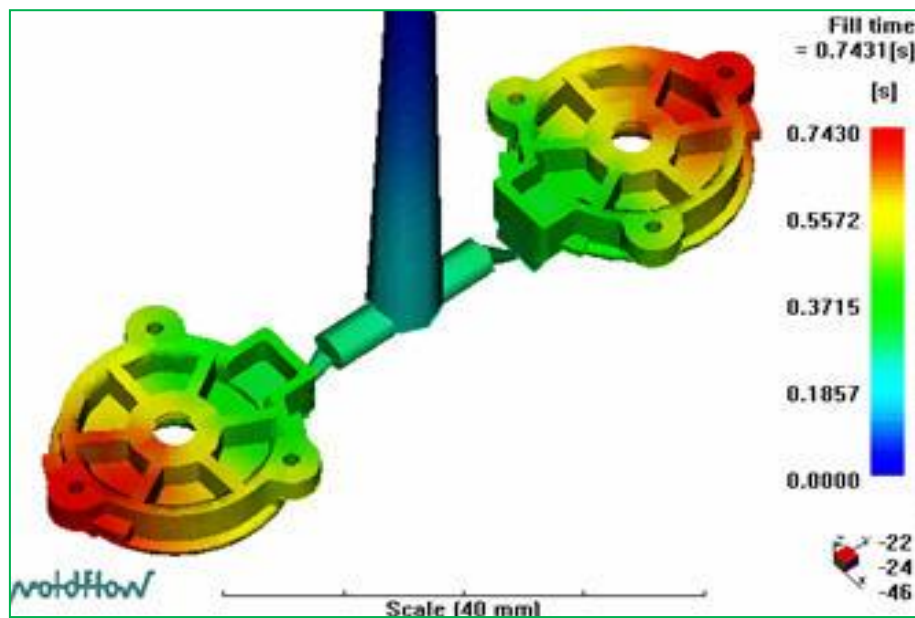


Figura 23. Entorno grafico Autodesk Moldflow Adviser 2010 [16]



Fuente. [16]

Figura 24. Imagen de resultados Autodesk Moldflow Adviser 2010



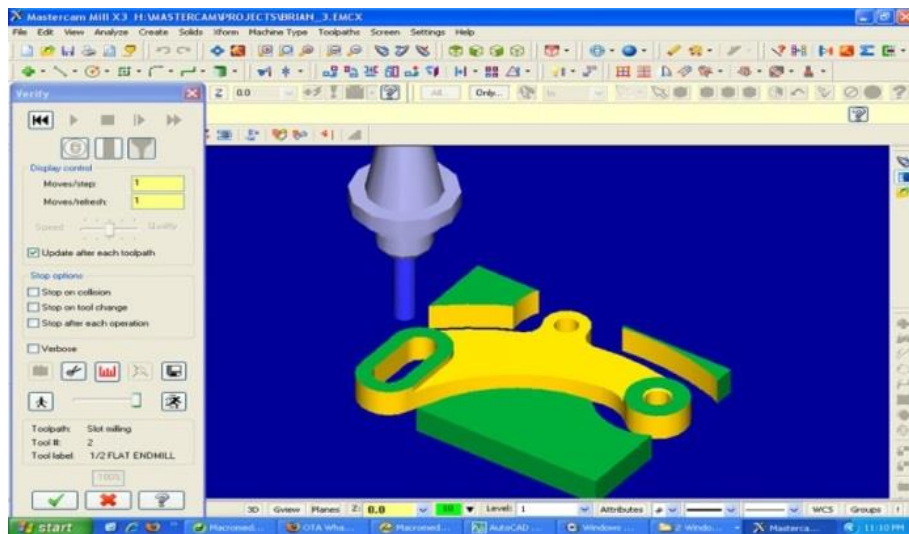
Fuente. [16]

### 4.3 SOFTWARE CAM (MASTERCAMX2)

La fabricación asistida por computadora también conocida por las siglas en inglés CAM (computer – aided - manufacturing)

Implica el uso de computadores y tecnología de cómputo para ayudar en todas las fases de la manufactura de un producto, incluyendo la planificación del proceso, la producción, mecanizado, CNC, administración y control de calidad, con una intervención del operario mínima.

Figura 25. Entorno grafico Master Cam X2 [16]



Fuente. [16]

Debido a sus ventajas, se suele combinar el diseño y la fabricación asistidos por computadora en los sistemas CAD/CAM. Esta combinación permite la transferencia de información desde la etapa de diseño a la etapa de planificación para la fabricación de un producto, sin necesidad de volver a capturar manualmente los datos geométricos de la pieza. La base de datos que se desarrolla durante el CAD es procesada por el CAM, para obtener los datos y las instrucciones necesarias para operar y controlar la maquinaria de producción, el equipo de manejo de material y las pruebas e inspecciones automatizadas para establecer la calidad del producto.

Figura 26. Centro de mecanizado Leadwell V30 Universidad ECCI



Fuente: Maquina CNC de la Universidad ECCI

## CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 DISEÑO PRELIMINAR. “FASE N°1”

El diseño preliminar de molde empieza con los requerimientos del cliente, basados en (4) cuatro normas ASTM (D-256, D-638 tipo 1, D-790 y D-5420) de pruebas de materiales termoplástico, con los especímenes específicos de la cada norma y (5) tipos de polímeros diferentes para la inyección.

5.1.1 Requerimientos del cliente. La Universidad ECCI, requiere de un molde para la inyección de probetas termoplásticas con el fin de realizar ensayos de laboratorio, de esta forma realizar una comparación más homogénea de los resultados obtenidos por la naturaleza de la obtención de las probetas. La gama de polímeros existentes es muy amplia y dado este motivo se analiza la posibilidad de un molde multipropósito, en el cual se pueda inyectar cinco (5) diferentes polímeros y cuatro (4) especímenes diferentes.

La Universidad cuenta con una máquina de inyección convencional referencia “PLASTIJET EUROMAP 110/45” para realizar las pruebas de inyección de los polímeros y funcionamiento del molde. En la Tabla 2, se especifican las características de la máquina, valores necesarios para realizar los cálculos del molde, ya que el molde se fabricará para trabajar en esta máquina, donde los valores relevantes de presión de inyección, fuerza de cierre de prensa, capacidad teórica de inyección y plastificación y distancias entre centros de columnas y separación mínima de placas, estos valores son tomados como base de los cálculos y la toma de decisiones en la fabricación del molde.

Tabla 2. Ficha técnica máquina de inyección “PLASTIJET EUROMAP 110/45”

Características de la maquina			
Descripcion	valor		unidad
Capacidad teorica de inyeccion	75	100	cm3
capacidad de inyeccion poliestireno	65	90	gr
diametro de tornillo	30	35	mm
maxima presion de material	1600	1150	kp/cm2
revoluciones de tornillo	20/200		rpm
potencia motor hidraulico	4		Kw
zonas de calentamiento	3		
potencia de calefaccion	3		kw
capacidad de plastificacion con poliestireno	35	40	kg/h
fuerza de cierre	45		tons
movimiento de placa movil	210		mm
distancia maxima entre placas	470		mm
dimesnsiones de placas	425 X 355		mm
altura minima del molde	110		mm
altura maxima del molde	260		mm
espacio libre entre columnas	270 X 200		mm
numero de columnas	4		
recorrido del ejector	regulable		
potencia del motor eletrico	7,5		kw
maxima presion de trabajo	140		kp/cm2
ciclos de secado por minuto	35		
potencia total instalado	10,5		kw
dimensiones generales	2,6 X 0,85 X 1,55		mts
peso maquina	1380		kg

Fuente. “PLASTIJET EUROMAP 110/45”

## 5.2 SELECCIÓN DE LAS NORMAS Y SUS ESPÉCIMENES

Para el diseño preliminar del molde, se verifican las formas, dimensiones y especificaciones de cada espécimen según la norma, con el fin de establecer el punto de partida para el desarrollo del proyecto.

- Prueba de Impacto Izod norma ASTM D-256.
- Prueba de Tensión norma ASTM D-638 tipo 1.
- Prueba de Flexión norma ASTM D-790.
- Prueba de Impacto Gardner norma ASTM D-5420.

La selección de las normas mencionadas anteriormente tubo origen respecto a que este tipo de ensayos son los más básicos y comunes con respecto a las pruebas destructivas de laboratorio,

## 5.3 MODELADO DE ESPÉCIMEN

Para el desarrollo de este proyecto se realizan los modelos de los especímenes de las normas seleccionadas, Norma Impacto Izod ASTM D-256, norma de Tensión ASTM D-638 tipo 1, Norma de Flexión ASTM D-790, norma Impacto Charpy ASTM D-5420.

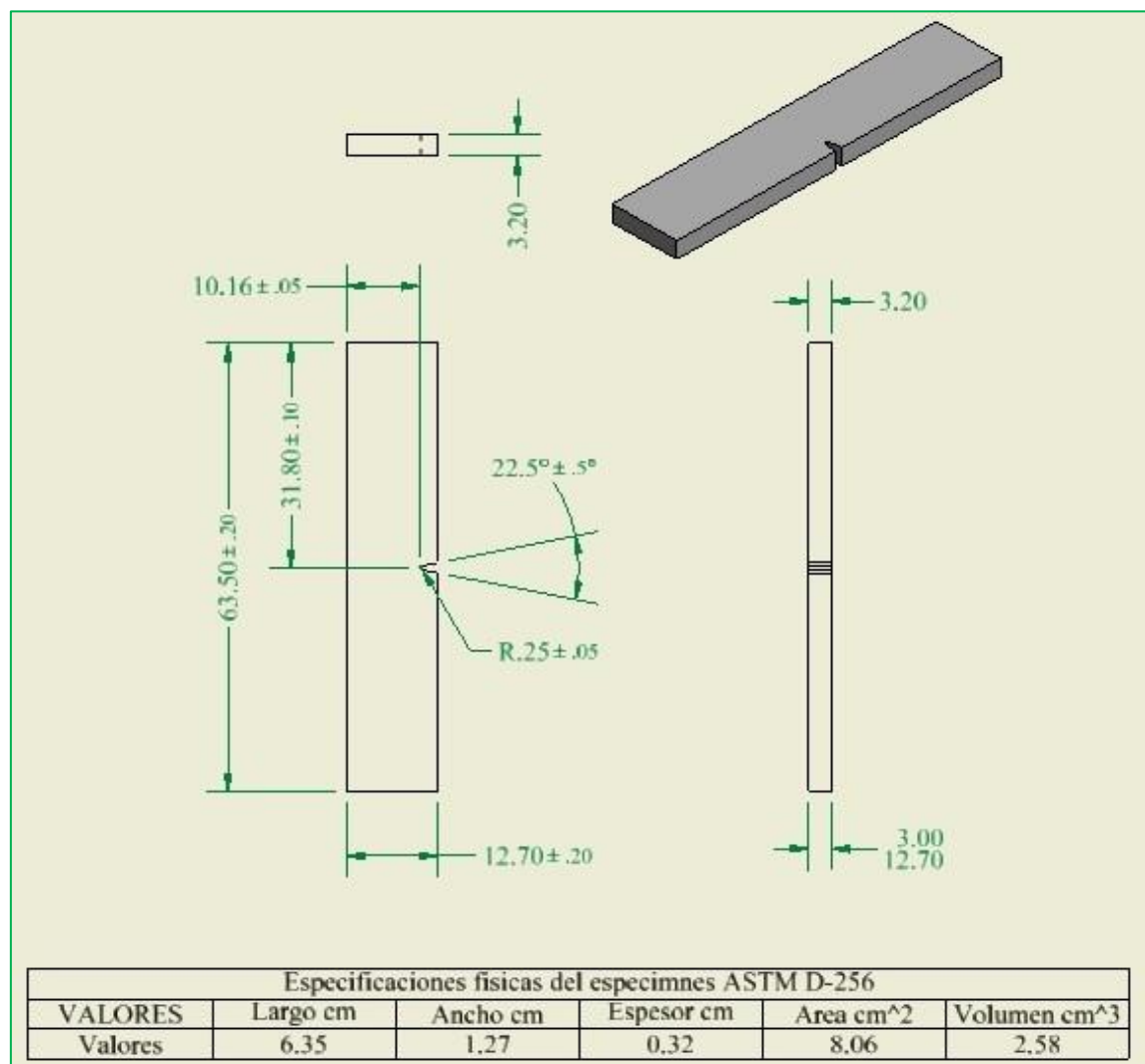
Para la modelación de los especímenes se tiene en cuenta la herramienta CAD (Autodesk Inventor 2011), basados en las especificaciones del espécimen plasmados en cada norma, se realiza la proyección tridimensional de cada espécimen con las respectivas medidas nominales, máximas y mínimas, teniendo en cuenta las tolerancias del espécimen.

Las dimensiones establecidas en los planos están en milímetros, las dimensiones seleccionadas en las tablas están en centímetros para efectos de cálculos. Esto se aplica para los (4) especímenes del proyecto.

5.3.1 Modelado de espécimen norma ASTM D-256. El espécimen de la norma ASTM D-256 es un espécimen de forma geométrica regular rectangular, caras planas, con una muesca lateral. Se utiliza en los ensayos de resistencia de los polímeros termoplásticos de impacto Izod.

En la Figura 27, se observan las dimensiones generales del modelo de acuerdo con la norma ASTM D-256, y se observan los valores dimensiones básicos para realizar los cálculos requeridos para el proceso de fabricación de molde.

Figura 27. Modelo de espécimen de la norma ASTM D-256

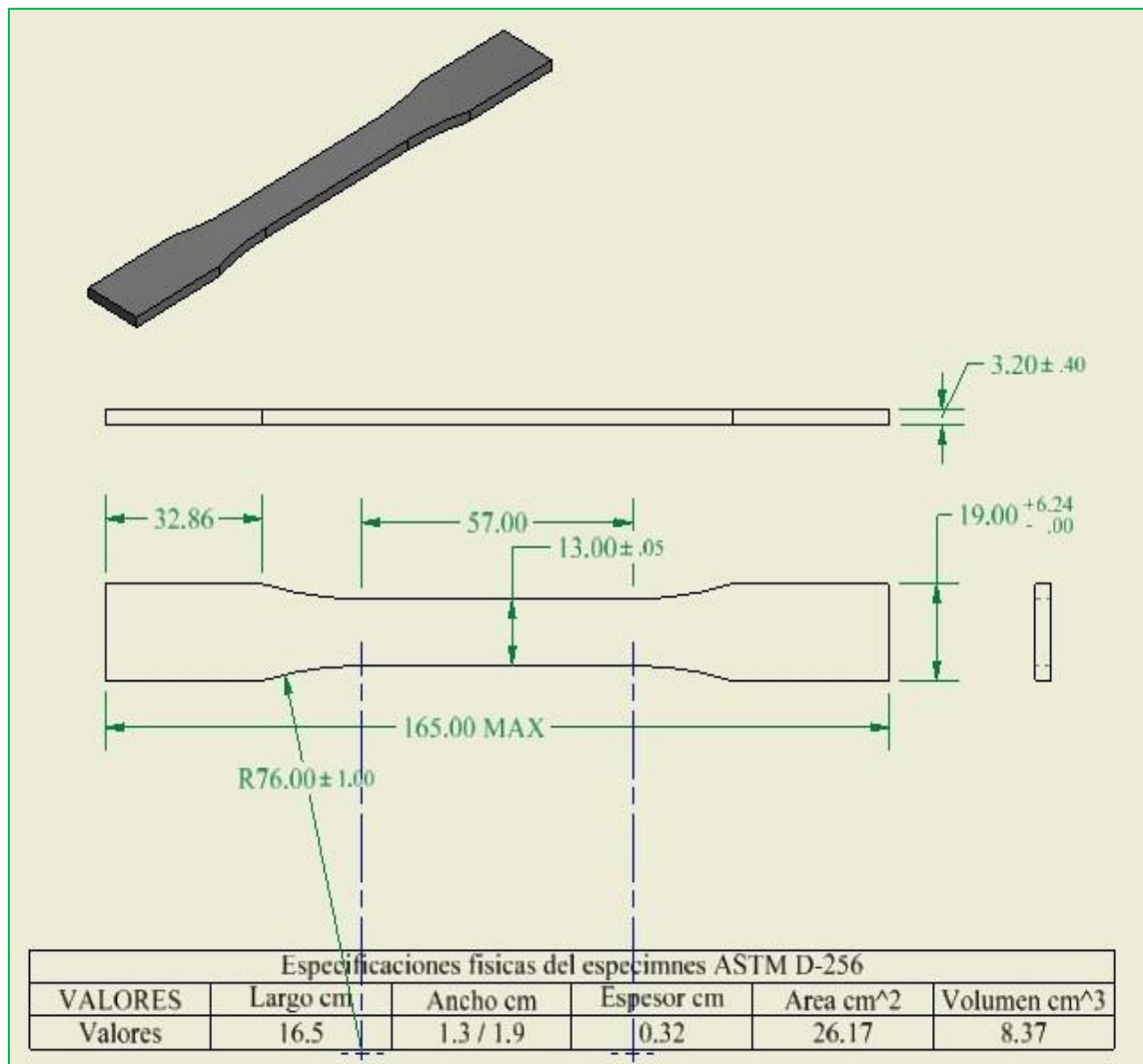


Fuente. Autor

5.3.2 Modelado de espécimen norma ASTM D-638 tipo 1. El espécimen de la norma ASTM D-638 tipo 1, es usado para las pruebas de tracción de los polímeros, este espécimen tiene forma de corbatín.

En la Figura 28 se observan las dimensiones generales del modelo de acuerdo con la norma ASTM D-638 tipo 1, y se observan los valores dimensiones básicos para realizar los cálculos requeridos para el proceso de fabricación de molde.

Figura 28. Modelo de espécimen de la norma ASTM D-638 tipo 1



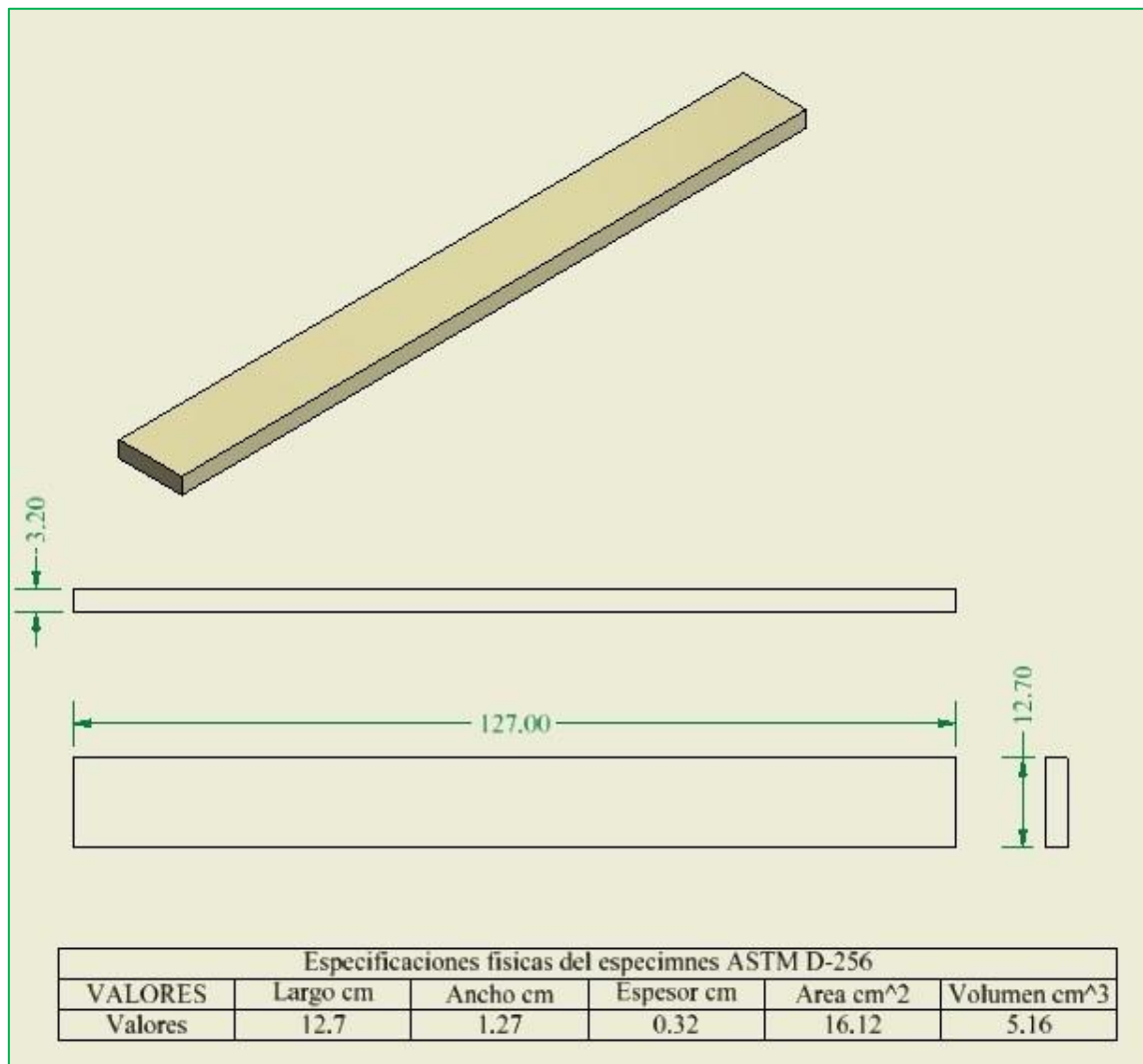
Fuente. Autor



5.3.3 Modelado de espécimen norma ASTM D-790. El espécimen de la norma ASTM D-790 es un espécimen de forma geométrica regular rectangular, caras planas, usado para los ensayos de flexión de los polímeros reforzados, no reforzados y aislantes eléctricos.

En la Figura 29, se observan las dimensiones generales del modelo de acuerdo con la norma ASTM D-790, y se observan los valores dimensiones básicos para realizar los cálculos requeridos para el proceso de fabricación de molde.

Figura 29. Modelo de espécimen de la norma ASTM D-790

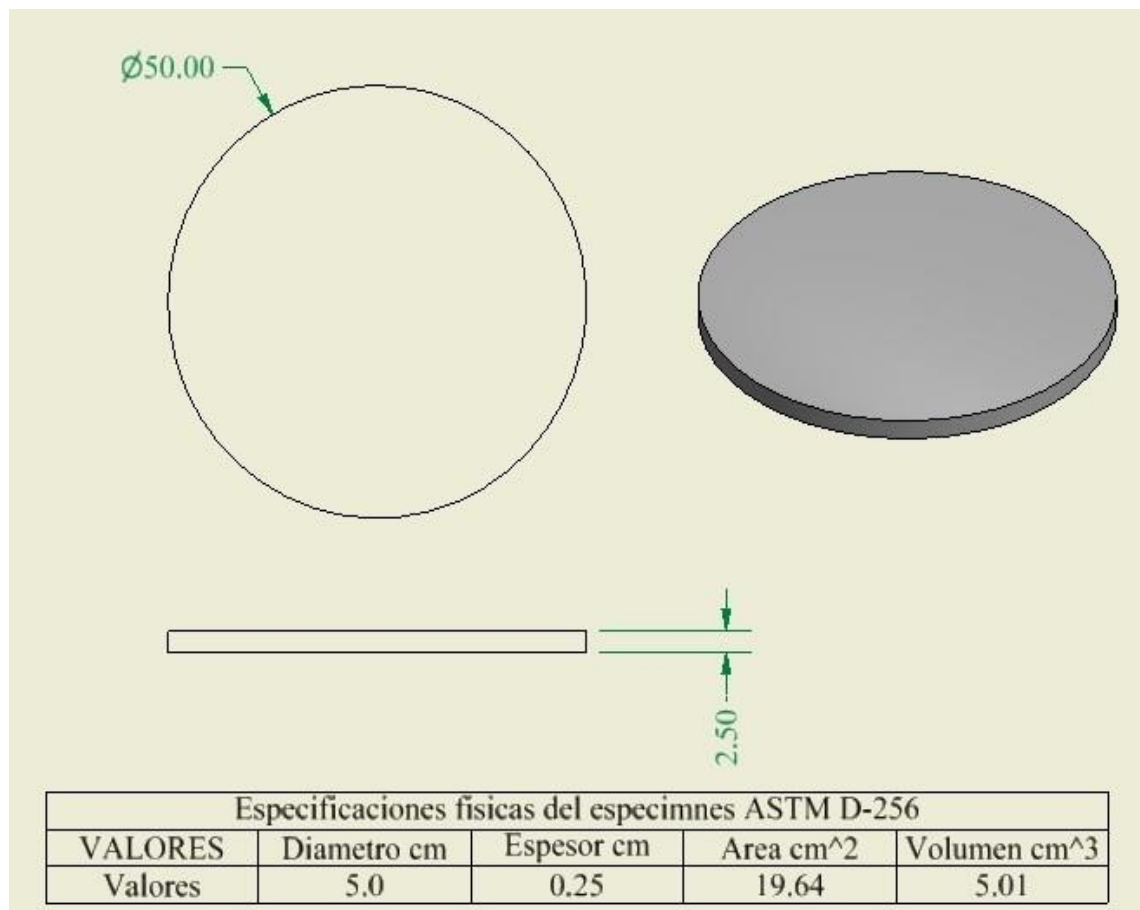


Fuente. Autor

5.3.4 Modelado de espécimen norma ASTM D-5420. El espécimen norma ASTM D-5420, es un espécimen de geometría circular de caras planas, se usa en la prueba de impacto Gardner. (Dardo cayente)

En la Figura 30, se observan las dimensiones generales del modelo de acuerdo con la norma ASTM D-5420, y se observan los valores dimensiones básicos para realizar los cálculos requeridos para el proceso de fabricación de molde.

Figura 30. Modelo de espécimen de la norma ASTM D-5420



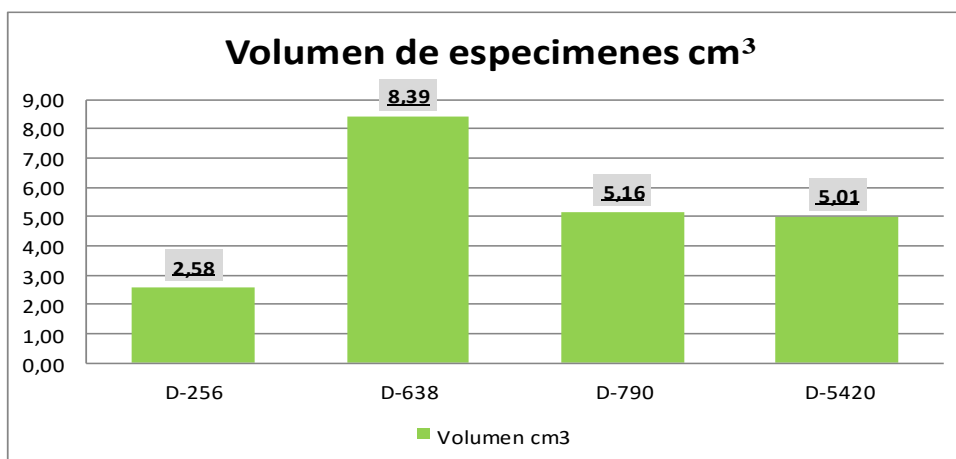
Fuente. Autor

## 5.4 CÁLCULO DE CANTIDAD DE CAVIDADES DEL MOLDE.

Los cálculos de cantidades de cavidades del molde son realizados para cada espécimen como entidad individual, y basados en él espécimen de mayor volumen a inyectar (**ASTM D-638 Tipo 1**) se establecen los parámetros de diseño. El parámetro de inicio es el volumen de cada espécimen.

En la Figura 31 se observan las diferencias entre volúmenes de los especímenes, este comparativo indica que el espécimen de mayor volumen de inyección y con el cual se deben realizar los cálculos para el molde.

Figura 31. Volumen de especímenes



Fuente. Autor

5.4.1 Cálculo cantidad cavidades en base al espécimen de mayor volumen. En relación a los datos de los especímenes, se realiza el cálculo de la cantidad de cavidades que se pueden tener en las placas de acuerdo con los siguientes factores. A) Fuerza de cierre de la máquina. B) Volumen máximo de inyección.

5.4.1.1 Cálculo debido a la fuerza de cierre de la máquina. [17] El cálculo de la cantidad de especímenes por fuerza de cierre de la máquina, contempla los siguientes factores para determinar la cantidad de insertos de puede llevar la placa de inyección, en este caso la referencia es el espécimen de mayor volumen, los resultados de este cálculo con este espécimen serán la base de la toma de decisiones para la cantidad de especímenes que llevara la placa de insertos del molde.

Para este cálculo la fórmula es. [17]

Fuente: Formula obtenida de la presentación de icipc.

Dónde:

$f$  = factor de seguridad 1.2 – 1.5  
 $10$  = conversión de unidades  
 $F_c$  = fuerza de cierre máx. (KN)  
 $A$  = área proyectada de la pieza (cm<sup>2</sup>)  
 $P_{iny}$  = presión de inyección en el molde (MPa)

- La fuerza máxima de cierre es de la maquina es 45 toneladas equivalentes a 441.45 KN.
- La presión de inyección máxima de la maquina es de 1600 Kg / cm<sup>2</sup> equivalentes a 156.91 MPa.

Tabla 3. Valor área proyectada de los especímenes de las normas

<b>Área proyectada especímenes ASTM</b>				
<b><u>Especimen</u></b>	ASTM D-256	ASTM D-638 T1	ASTM D-790	ASTM D-5420
<b><u>Valor</u></b>	8.06 cm <sup>2</sup>	26.17 cm <sup>2</sup>	16.12 cm <sup>2</sup>	19.64 cm <sup>2</sup>

Fuente. Autor

Formula usada para el cálculo de la cantidad de especímenes tomada de la presentación del **ICIPC**

$$n = \frac{f \times 10 \times F_c}{A \times P_{iny}} \quad (1)$$

Remplazando los valores en la fórmula para el espécimen ASTM D-638 tipo 1

#### 5.4.1.1.1 Cálculo fuerza de cierre espécimen ATSM D-256

$$n = \frac{1.5 \times 10 \times 441.3KN}{8.06cm^2 \times 156.91Mpa} \quad (2)$$

$$n = 5.23 \text{ und} \quad (3)$$

#### 5.4.1.1.2 Cálculo fuerza de cierre especímenes ASTM D-638 T1

$$n = \frac{1.5 \times 10 \times 441.3KN}{26.17cm^2 \times 156.91Mpa} \quad (4)$$

$$n = 1.57 \text{ und} \quad (5)$$

#### 5.4.1.1.3 Cálculo fuerza de cierre espécimen ASTM D-790

$$n = \frac{1.5 \times 10 \times 441.3KN}{16.12cm^2 \times 156.91Mpa} \quad (6)$$

$$n = 2.67 \text{ und} \quad (7)$$

#### 5.4.1.1.4 Cálculo fuerza de cierre especímenes ASTM D-5420

$$n = \frac{1.5 \times 10 \times 441.3KN}{19.64cm^2 \times 156.91Mpa} \quad (8)$$

$$n = 2.15 \text{ und} \quad (9)$$

Tabla 4. Resultado cantidad de especímenes por cálculo de fuerza de cierre.

<b>Resultado cantidad de especímenes por fuerza de cierre maquina</b>				
<b><u>Norma</u></b>	ASTM D-256	ASTM D-638	ASTM D-790	ASTM D-5420
<b><u>Cantidad</u></b>	5.23 und	1.57 und	2.67 und	2.15 und

Fuente. Autor

Con los valores obtenidos de cantidad de cavidades se establece que la cantidad máxima cavidades por placa para cada norma. Es necesario realizar otro calculo debido a que el espécimen de la norma ASTM D-638 es de 1.57 unidades.

5.4.1.2 Cálculo debido volumen máximo de inyección. [17] El cálculo debido al volumen máximo de inyección involucra el parámetro de máquina de capacidad teórica de inyección, volumen de plástico de la cual tiene capacidad para transportar el tornillo de inyección de la maquina con la cual se realiza. Para este

cálculo identificamos el espécimen de mayor volumen y se realiza la comparación de los otros especímenes.

#### 5.4.1.2.1 Cálculo volumen máximo de inyección espécimen ASTM D-256

Para este cálculo la fórmula es. [17]

$$nVmax = \frac{0.8 \times Vs}{Vp} \quad (10)$$

Dónde:

$nVmax$  = cantidad de especímenes máximo de inyección.

$Vs$  = volumen máximo de inyección capacidad teórica de inyección.

$Vp$  = volumen total de inyección de la pieza.

El volumen máximo de inyección es de 75 cm<sup>3</sup>, capacidad teórica de inyección.

El volumen total a inyectar es el volumen de la pieza.

Tabla 5. Volumen proyectado de los especímenes de las normas

Volumen de especímenes de las normas				
<b><u>Especimen</u></b>	ASTM D-256	ASTM D-638	ASTM D-790	ASTM D-5420
<b><u>Valor</u></b>	2.58 cm <sup>3</sup>	8.14 cm <sup>3</sup>	5.19 cm <sup>3</sup>	5.01 cm <sup>3</sup>

Fuente. Autor

#### 5.4.1.2.1 Cálculo volumen máximo de inyección espécimen ASTM D-256

$$nVmax = \frac{0.8 \times 75cm^3}{2.58cm^3} \quad (11)$$

$$nVmax = 23.26 und \quad (12)$$

#### 5.4.1.2.2 Cálculo volumen máximo de inyección espécimen ASTM D-638 T1

$$nVmax = \frac{0.8 \times 75cm^3}{8.93cm^3} \quad (13)$$

$$nVmax = 7.14 und \quad (14)$$

#### 5.4.1.2.3 Cálculo volumen máximo de inyección espécimen ASTM D-790

$$nV_{max} = \frac{0.8 \times 75 \text{ cm}^3}{5.19 \text{ cm}^3} \quad (15)$$

$$nV_{max} = 11.63 \text{ und} \quad (16)$$

#### 5.4.1.2.4 Cálculo volumen máximo de inyección espécimen ASTM D-5420

$$nV_{max} = \frac{0.8 \times 75 \text{ cm}^3}{5.01 \text{ cm}^3} \quad (17)$$

$$nV_{max} = 11.95 \text{ und} \quad (18)$$

Tabla 6. Resultado calculo especímenes volumen máximo de inyección

Resultado cantidad de especímenes por volumen máximo de inyección				
<b><u>Norma</u></b>	ASTM D-256	ASTM D-638	ASTM D-790	ASTM D-5420
<b><u>cantidad</u></b>	23.26 und	7.14 und	11.63 und	11.95 und

Fuente. Autor

### 5.5 PARÁMETROS DE SELECCIÓN CANTIDAD CAVIDADES DEL MOLDE

5.5.1 Balanceo volumétrico. Se refiere al equilibrio del volumen del material de inyección por la cantidad de cavidades de la placa.

De acuerdo con la cantidad de cavidades que se dispongan en la placa, debe existir la relación de volumen semejante entre las mismas.

Las cavidades del molde deben estar distribuidas en forma simétrica para alcanzar el llenado del molde total, de las cavidades en el mismo momento. Las cavidades del molde tienen la misma geometría y por consiguiente el mismo volumen de inyección, de acuerdo con el cálculo de cantidad de cavidades se determina la distribución en la placa de cavidades.

5.5.2 Cantidad de cavidades por placa. Es determinado por los cálculos de número de cavidades, se elige el menor número obtenido entre los cálculos.

Tabla 7. Cantidad de cavidades por placa de espécimen

<b>Cantidad de cavidades por placa</b>				
<b><u>Norma</u></b>	ASTM D-256	ASTM D-638	ASTM D-790	ASTM D-5420
<b><u>Fuerza de cierre</u></b>	5.23 und	1.57 und	2.67 und	2.15 und
<b><u>Volumen máximo inyección</u></b>	23.26 und	7.14 und	11.63 und	11.95 und
<b>Cantidad de cavidades por placa</b>	<b>2 und</b>	<b>2 und</b>	<b>2 und</b>	<b>2 und</b>

Fuente. Autor

De acuerdo con los resultados obtenidos se establece la cantidad máxima de cavidades por placa de especímenes. Con el espécimen de la norma ASTM D-638 se establece que deben ser dos (2) especímenes por placa. Aunque por fuerza de cierre el cálculo obtenido es de 1.57 und.

Por ser un molde multipropósitos se toma la decisión de realizar dos (2) especímenes por placa de cada espécimen, ya que los especímenes de las normas ASTM D-790 y ASTM D-5420 cumplen con esta condición y el espécimen de la norma ASTM D-256 cumple superiormente esta condición.

El espécimen de la norma ASTM D-638 se encuentra por debajo de lo establecido en el cálculo por fuerza de cierre del molde, aunque con el cálculo de volumen máximo de inyección está dentro de los parámetros requeridos.

Para la selección de la cantidad de cavidades por placa se establece que la cantidad máxima de especímenes que debe haber por placa es el resultado de menor magnitud entre los dos cálculos.

Para este caso se opta por tener las placas con cavidades iguales siguiendo la tendencia de dos (2) especímenes por placa.



## 5.6 SELECCIÓN DE LOS MATERIALES POLÍMEROS DE INYECCIÓN

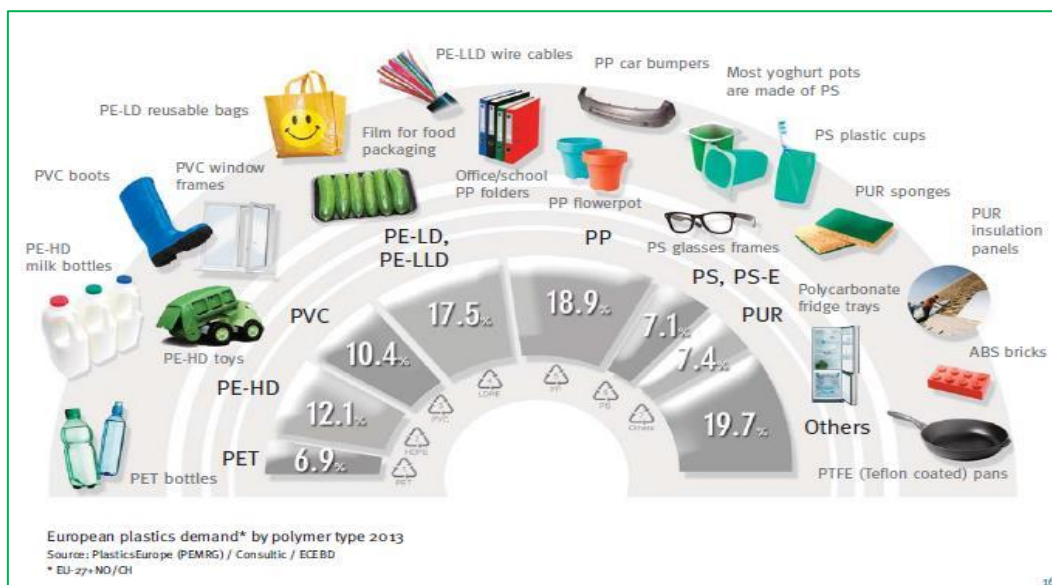
Para el desarrollo de este proyecto es necesario seleccionar los polímeros con los cuales se realizarán los cálculos, simulaciones y posterior inyección de especímenes.

Basados en estudios de “Plastics Europe, “Plastics - the facts 2014/2015: An analysis of European plastics production, demand and waste data,” PlasticsEurope, pp. 1–34, 2015” y en revisión de la gráfica, muestra la tendencia de uso de polímeros nivel mundial, por lo cual se realiza la selección de los siguientes polímeros para realizar los cálculos, simulaciones y posterior inyección de especímenes.

Polipropileno.	(PP)
Poliestireno.	(PS)
Polietileno de baja densidad.	(LDPE)
Polietileno de alta densidad.	(HDPE)
Poliamida 66. Nylon 66.	(PA66)

En la Figura 32, se observan los porcentajes de producción y uso de los diferentes tipos de polímeros a nivel mundial. Con esta información se establecen los polímeros con los cuales se realizan las simulaciones y los cálculos para la fabricación del molde multipropósitos.

Figura 32. Imagen de producción de polímeros en el mundo [18]



Fuente. [18]

## 5.7 DISEÑO BÁSICO DEL MOLDE

Este tipo de herramientas o utillajes están compuestos de varias partes para el cumplimiento de la función de la inyección de plásticos.

**Cavidad.** La cavidad del molde es la forma específica de la pieza a inyectar, está grabada en la placa en bajo o alto relieve de acuerdo con la necesidad y construcción del molde específico. Para este caso son los especímenes de las normas seleccionadas para la inyección de las probetas. Los especímenes se graban en la placa de cavidades en bajo relieve y con un ángulo de desmoldeo para la extracción de probeta solidificada.

**Numero de particiones.** Para un molde de cavidades de geometría plana, el número de particiones del molde son dos (2), una placa donde se graba el total del espécimen que en este caso será la placa móvil, y una placa fija que solo tendrá contacto con el material en la superficie de la probeta a inyectar. Con la selección de este parámetro la probeta inyectada no tendrá líneas de soldadura.

**Tipo de colada.** Existen dos tipos de colada. La colada fría es el remanente de polímero solidificado que queda en los canales, y que es necesario cortar de la pieza final. La colada caliente mantiene al polímero en estado fundido para continuar con la inyección. La mínima complejidad de las cavidades del molde permite que el sistema de inyección sea de colada fría, donde el molde es llenado en su totalidad de polímero, este a su vez se solidifica y se retira de las piezas el remanente después de la expulsión de las mismas.

**Canal de alimentación. “Bebedero”.** Es el elemento de conexión entre el molde y la boquilla de la máquina, conduce el material fundido desde la boquilla hasta el interior del molde donde están los canales de distribución. La geometría interna es circular cónica para permitir una fácil salida del material solidificado cuando la apertura del molde se realice.

**Mazarota.** La configuración de la mazarota de alimentación es de sección circular, en forma de cono divergente, para la retención del material en la placa móvil del molde cuando abre y no caiga antes que termine en ciclo de inyección.

**Canales de distribución primario y secundario.** Ramificación de unión entre la alimentación del molde y las cavidades del mismo. Selección de la geometría de los calanes, semicircular en la placa de las cavidades, para la fácil extracción de la araña de unión de las cavidades.

**Entradas de material a las cavidades. “Punto de inyección”.** Se determina normalmente una por cavidad, los factores de evaluación son la máxima longitud del recorrido del flujo del material, el equilibrio de presiones sobre los machos y los

criterios de calidad tales como son el aspecto, líneas de unión y distorsión. La posición del punto de inyección está en la parte superior de la cavidad, determinada por la orientación molecular del flujo, para que sea un flujo laminar a lo largo del espécimen.

**Evacuación del aire.** La evacuación del aire de las cavidades del molde es en parte opuesta del punto de inyección, a medida que el material entra en la cavidad desaloja el aire. El venteo de molde se puede realizar en el borde al final de las cavidades para que el aire salga cuando el material este llenando la cavidad, este espacio de venteo debe ser lo suficientemente grande para que salga el aire, pero no para que salga material. Valores promedio de profundidad de 0.01 a 0.02 mm.

**Mecanismo de desmoldar. “Expulsión”.** Este mecanismo se usa para sacar las piezas del molde, en este caso se usará con pines de expulsión, que tendrá contacto en los extremos del espécimen. Este mecanismo de expulsión cuenta con columnas guías de deslizamiento de la placa que le permite una fácil expulsión de las piezas y el regreso de la placa en forma rápida.

**Canales de refrigeración.** Los canales de refrigeración de la placa son los conductos por donde pasa el refrigerante del proceso, estos agujeros están dispuestos a lo largo de la placa conectados en circuito cerrado para la recirculación del fluido. La refrigeración de las placas de contacto con el polímero permite disminuir el tiempo de solidificación del material fundido.

## 5.8 CÁLCULOS DE COMPONENTES MECÁNICOS DEL MOLDE

Los cálculos realizados para los componentes son los siguientes: [19]

- Cálculo de espesor de placa.
- Selección de diámetros y longitud de alimentación principal. Bebedero.
- Selección de canales de alimentación primarios y secundarios.
- Selección de punto de inyección.
- Evacuación de aire.
- Canales de refrigeración.

5.8.1 Cálculo de espesor de pared de placa de insertos. Se realiza utilizando la teoría de placas, para la seleccionar de esta fórmula se tiene en cuenta que los factores de módulo de elasticidad del material y la fuerza aplicada, que es la fuerza de la maquina en cierre de la prensa.

Usando la formula. [20]

$$\delta_{max} = \frac{KwL^4}{Et^3} \quad (19)$$

Dónde:

$\delta_{max}$  = Máxima deflexión del centro de la placa (m) = 0.0001m  
 W = Fuerza aplicada por unidad de área (Pa) = 1.6 MPa  
 L = Largo de la pieza (m) = 0.270 m  
 E = Módulo de elasticidad del acero = 207GPa  
 t = Espesor de la placa (m) =  
 K = Factor de condición de soporte de la placa = 0.026

Despejando el espesor (**t**) la ecuación resultante.

$$t = \sqrt[3]{\frac{K \times w \times L^4}{E \times \delta_{max}}} \quad (20)$$

Tabla 8. Longitudes de especímenes

Longitud de especímenes				
<b><u>Norma</u></b>	ASTM D-256	ASTM D-638	ASTM D-790	ASTM D-5420
<b><u>valor</u></b>	0.130 m	0.270 m	0.230 m	0.180 m

Fuente. Autor

Reemplazando los valores

#### 5.8.1.1 Cálculo espesor de pared espécimen ASTM D-256

$$t = \sqrt[3]{\frac{0.026 \times 1.6MPa \times (0.130m)^4}{207GPa \times 0.0001m}} \quad (21)$$

$$t = 0.017478 \text{ m} \quad (22)$$

#### 5.8.1.2 Cálculo espesor de pared espécimen ASTM D-638 tipo 1

$$t = \sqrt[3]{\frac{0.026 \times 1.6MPa \times (0.270m)^4}{207GPa \times 0.0001m}} \quad (23)$$

$$t = 0.022022 \text{ m} \quad (24)$$

#### 5.8.1.1 Cálculo espesor de pared espécimen ASTM D-256

$$t = \sqrt[3]{\frac{0.026 \times 1.6 \text{ MPa} \times (0.230 \text{ m})^4}{207 \text{ GPa} \times 0.0001 \text{ m}}} \quad (25)$$

$$t = 0.021140 \text{ m} \quad (26)$$

#### 5.8.1.1 Cálculo espesor de pared espécimen ASTM D-256

$$t = \sqrt[3]{\frac{0.026 \times 1.6 \text{ MPa} \times (0.180 \text{ m})^4}{207 \text{ GPa} \times 0.0001 \text{ m}}} \quad (27)$$

$$t = 0.019481 \text{ m} \quad (28)$$

Tabla 9. Resultado espesor de pared de placa de insertos

<b>Resultado espesores de pared de placa de insertos</b>				
<b><u>Norma</u></b>	ASTM D-256	ASTM D-638	ASTM D-790	ASTM D-5420
<b><u>valor</u></b>	17.47 mm	22.02 mm	21.14 mm	19.48 mm

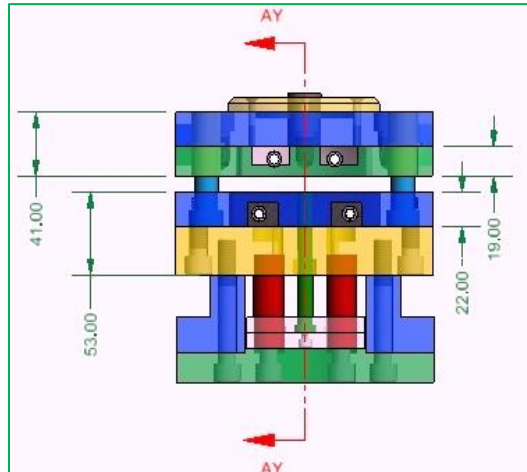
Fuente. Autor

De acuerdo con los resultados obtenidos de los cálculos de espesor de placa, se observa que la placa de cavidad de mayor valor es la del espécimen de la norma ASTM D-638 T1. Por esta razón se opta para que el espesor de las placas de las cavidades tenga el mismo espesor, es decir que todas las placas de las cavidades tengan el mismo ancho, para este caso de 22mm.

Por el hecho de ser un molde multipropósitos, donde se realizan cambios de placas de insertos, es necesario que las geometrías de las piezas intercambiables sean iguales en el largo, el ancho y el espesor, esto con el fin de conservar las dimensiones y geometrías del molde.

De acuerdo con el resultado del espesor de la placa, se realiza en modelado general del molde con todos sus componentes, respetando el espesor de pared de la placa. En la Figura 33, se observan las dimensiones de espesor de pared de las placas de contacto metal Polímero. Con la ilustración de la Figura 33 se dimensionan los componentes del molde en su totalidad.

Figura 33. Espesor de pared del molde



Fuente. Autor

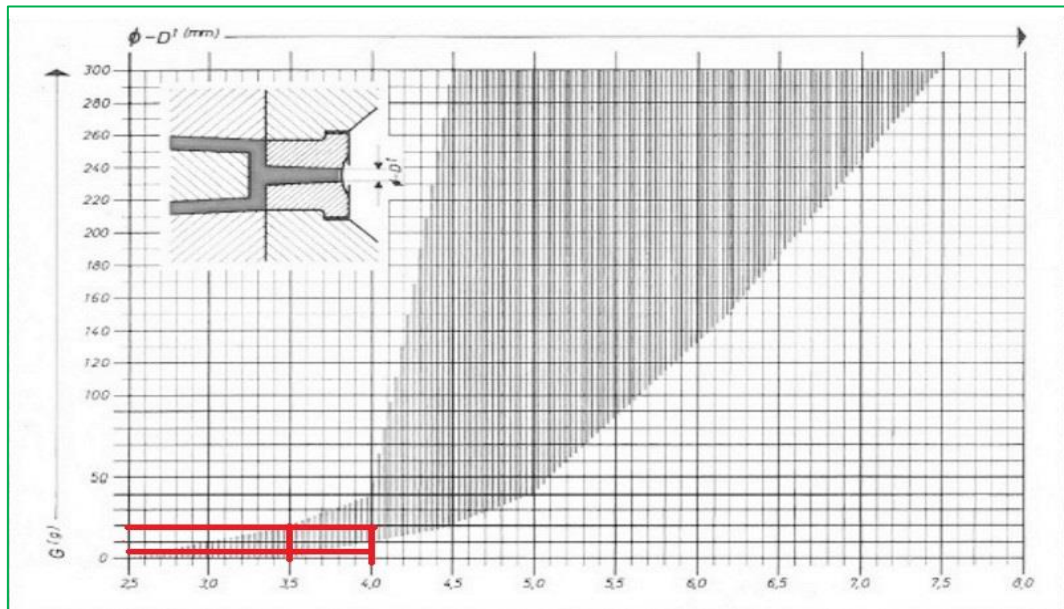
5.8.2 Selección de diámetros de bebedor de molde. El diámetro menor del bebedero “d” debe ser mayor que el diámetro de la boquilla de inyección del cilindro de plastificación, el espesor de la pieza es de 3.4mm y por lo tanto el Diámetro mayor “D” debe ser mayor. Las recomendaciones de grados de inclinación para el desmoldeo están entre 1 a 2 grados. “α”. [20]

La Figura 34, diagrama para determinar la amplitud del diámetro del canal de entrada sistema de bebederos puntiforme, en relación con el peso de la pieza.  $G$  = peso de la pieza en gramos.  $\varnothing-D^2$  = diámetro del canal puntiforme de entrada en mm.

Para definir el diámetro del menor del orificio del bebedero, se realiza el cálculo del peso de cada espécimen de cada norma, como se observa en la Tabla 10, con los polímeros ya seleccionados. El valor de peso calculado es unitario, para este caso se multiplica por 2 ya que se seleccionaron 2 especímenes por placa y don el valor resultante se establece el parámetro de selección.

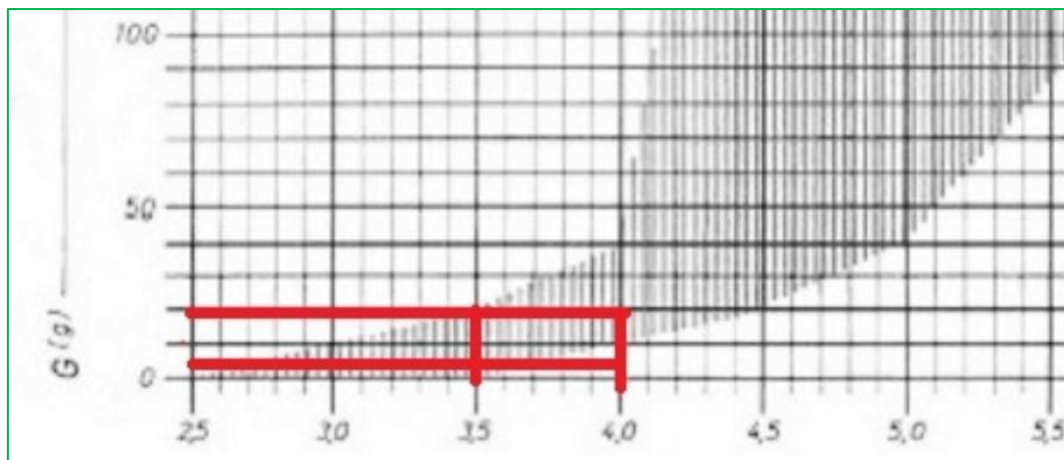
Por ser un molde multipropósito se realiza la selección del diámetro de mayor valor, para el espécimen de mayor peso, para este caso específico el espécimen de la norma ASTM D-638 T1.

Figura 34. Diagrama para determinar la amplitud del diámetro del bebedero [21]



Fuente. [21]

Figura 35. Detalle de selección de diagrama selección bebedero



Fuente. Autor



Tabla 10. Cálculo peso especímenes

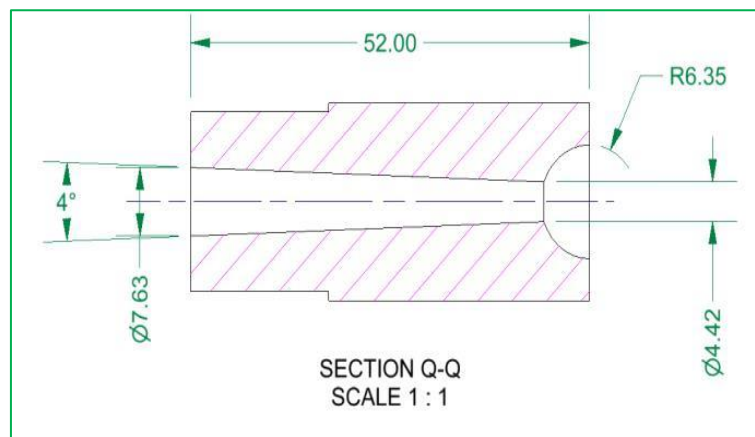
Densidad polímeros								
		Polipropileno (PP)	Poliestireno (PS)	Poliétileno de baja densidad (LDPD)	Poliétileno de alta densidad (HDPE)	Poliamida 66 (PA66)		
norma	Vol. cm <sup>3</sup>	0.91	1.05	0.95	0.93	1.13	Peso pieza gr	Peso 2 piezas gr
ASTM D-256	2.58	2.35	2.47	2.34	2.18	2.46	2.47	5.42
ASTM D-638 T1	8.39	7.64	8.81	7.97	7.81	9.49	9.49	20.87
ASTM D-790	5.16	4.70	4.93	4.69	4.36	4.92	4.93	10.85
ASTM D-5420	5.01	4.56	5.26	4.76	4.66	5.66	5.66	12.46

Fuente. Autor

En la Figura 35 se observa a detalle la selección, las líneas de color rojo están entre los valores máximos y mínimos de peso respecto a los valores obtenidos en el cálculo de la Tabla 10, se observa que hay un margen entre 3.5 y 4 milímetros de diámetro inicial.

Se selecciona la herramienta para realizar la operación, esta herramienta es una rima cónica y las medidas convencionales son: diámetro menor 4mm, diámetro mayor 8mm, donde la longitud está dispuesta por el espesor total de pared de la placa fija. 52mm, con una conicidad superior a ( $\alpha = 4$ )

Figura 36. Diseño final de bebedero de molde



Fuente. Autor



5.8.3 Selección de diámetro de canales de alimentación primarios y secundarios. En esta sección se hace referencia a la distribución que llevara el material desde el bebedero, hasta el punto de inyección de la pieza, esta parte del molde se determina teniendo en cuenta los siguientes factores.

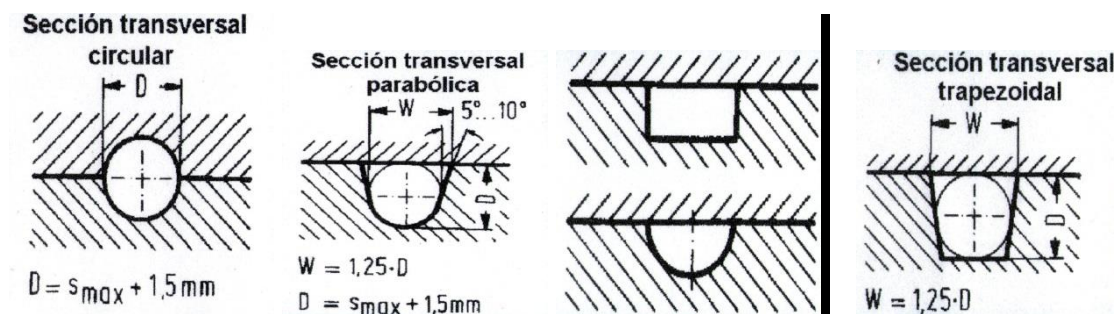
El primer punto es la selección de la sección de área transversal, donde los modelos de selección son los siguientes. Los de área transversal circular, área transversal parabólica, área transversal cuadrada, área transversal semi circular y área transversal trapezoidal. Como se muestran en la Figura 37.

Para este caso específico se selecciona la sección transversal trapezoidal, debido a que es la que mejores condiciones de operación tiene, esta sección es la de mejores características constructivas y funcionales del molde. Por facilidad de fabricación se usa la sección transversal semicircular, esta fabricación se realiza en base a las operaciones de mecanizado necesarias para realizar y la herramienta específica que se requiere, la comparación de las dos secciones, la sección transversal trapezoidal requiere de mayores operaciones para realizar la inclinación de las paredes, para el caso hay que tener la herramienta de forma trapezoidal, y/o realizar operaciones de eliminación de viruta sobre la cara, y para la sección transversal semicircular es necesario un herramienta de punta redonda que es comercial.

La selección se basa en la fácil obtención de la herramienta y las operaciones de mecanizado más simple.

Debido a que la velocidad de enfriamiento es baja, porque permite mejor fluidez del polímero fundido, y se realiza en una (1) sola cara del molde, en la placa de insertos de los especímenes por su fácil mecanizado.

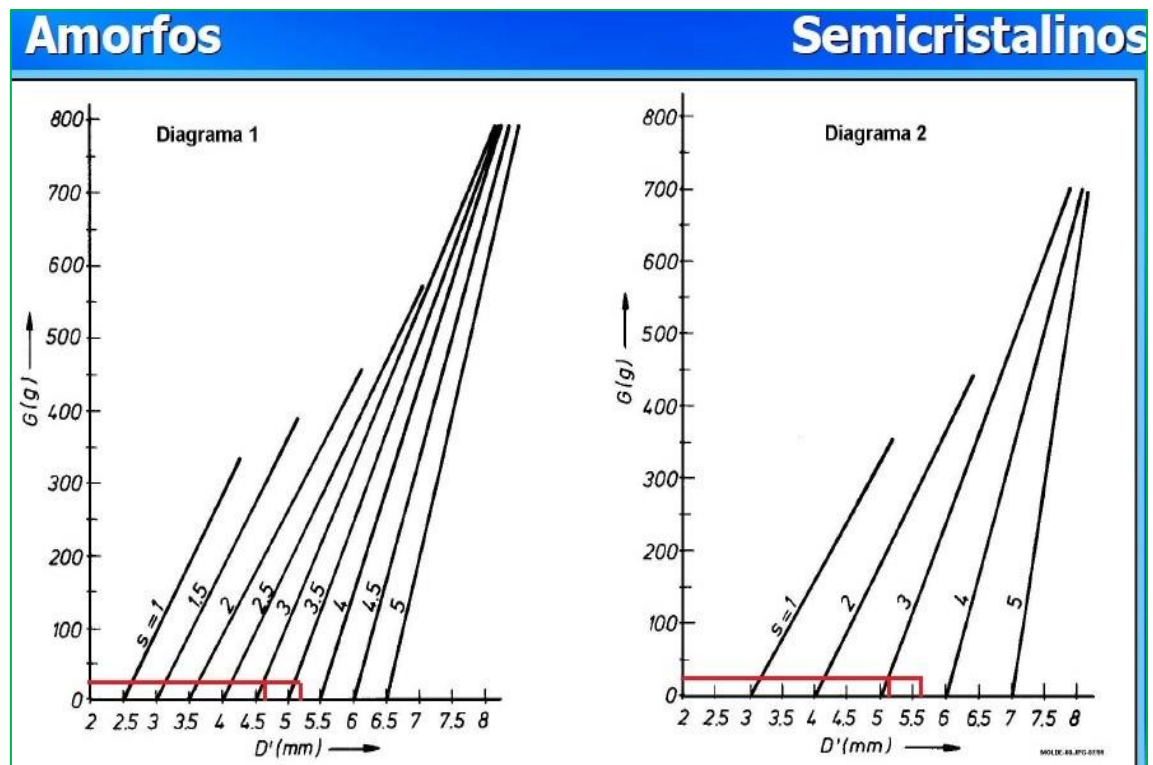
Figura 37. Secciones transversales de canales de distribución [17]



Fuente. [17]

La recomendación principal para la selección de la sección transversal de los canales de distribución es el fácil desplazamiento del material fundido y a su vez el desmolde del material solidificado, ya que la sección semicircular no tiene aristas vivas, y por estar en la placa de la cavidad su contacto es con la placa fija, y validando la selección de los diámetros permisibles de acuerdo con el tipo de polímero se define que el diámetro debe estar en el rango entre 4.5mm y 5mm.

Figura 38. Diagrama de selección de diámetro de canales de distribución [17]



Fuente. [17]

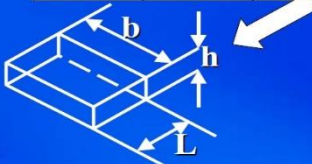
5.8.4 Selección de punto de inyección. Para la selección del punto de inyección, se evalúan los diferentes tipos existentes, sus ventajas y sus desventajas, siendo la maquinabilidad el factor de mayor validez para la fabricación.

Se realiza la selección del punto de inyección de forma rectangular, para este tipo de geometría están establecidos parámetros de fabricación respecto al peso de la pieza. En la Figura 39 se observa que dependiendo del peso de la pieza, las dimensiones de la sección del punto de inyección están establecidas.

Figura 39. Punto de inyección

➤ **Rectangular**  
➤  **$b=3h$     $L=2h$**

Peso [gr]	h [mm]	b [mm]
0-5	0.25	0.75
5-40	0.50	1.50
40-200	0.75	2.25
>200	1.00	3.00



Fuente. [17]

Tabla 11. Valores de fabricación de punto de inyección rectangular

Peso en gramos	Altura mm	Ancho mm
5 - 40	0.50	1.50

Fuente. Autor

El mecanizado del punto de inyección se realiza en base a los datos de la tabla y la disponibilidad de la herramienta para realizar este mecanizado. El diámetro mínimo de herramienta disponible para realizar este mecanizado es de 3mm. Se determina que la altura del punto de inyección sea de 1mm, al ancho de 3mm y la longitud de 3mm para cada inserto en la placa de la cavidad.

5.8.5 Evacuación de aire. La evacuación de aire es un mecanizado realizado en la placa de inserto, generalmente en los extremos finales de las cavidades del molde, este mecanizado es un espacio suficientemente amplio por donde pueda evacuar el aire en el momento de ingreso del material a las cavidades, pero lo suficientemente estrecho para que no salga material y tampoco genere rebabas. Lo recomendado es que la altura de esta superficie sea entre los rangos de 0.005mm hasta 0.01mm, donde se manejó este rango para la construcción de esta parte del molde. [17]

5.8.6 Canales de Refrigeración. Los canales de refrigeración son ductos mecanizados en las placas de contacto metal polímero del molde, la finalidad de estos mecanizados es el paso de refrigerante para el enfriamiento de las placas, estos canales se realizan bajo los siguientes parámetros.

Herramientas disponibles por diámetro y por longitud. Herramientas para la fabricación de roscas. Contando con estos parámetros, se selecciona el diámetro del agujero de paso de fluido, de 8mm, ya que la longitud de las placas es de 200mm y la herramienta está disponible, y para la rosca de conexión se determina que sea de 1/8npt, ya que el espacio para realizar estos mecanizados es de 17mm, contemplando que el diámetro exterior de la rosca es de 11mm, y que el espacio entre la base de la cavidad del molde y el extremo del orificio es de 6.5mm. Con esta construcción no se afecta la estructura del molde.

5.8.7 Sistema de expulsión. Existe una gran variedad de sistemas de expulsión en los moldes, generalmente la restricción para este elemento del molde es que no marque la pieza en el momento de la expulsión, que sea fácil de mantenimiento. Para este molde se diseñó una expulsión de forma en que, en el momento de la expulsión deslice sobre barras guías, para que de esta forma no haya posibilidad de daño en los expulsores, con barras de retorno, las cuales no permiten el contacto directo entre los expulsores y la placa fija del molde en el momento de cierre del molde, es decir que cuando el molde cierra las barras de retorno hacen contacto con la placa fija del molde y el conjunto de expulsión regresa a su posición.

## 5.9 MODELADO Y PLANOS DE PLACAS DE INSERTOS

El modelado de las placas de los especímenes se realiza en base al diseño preliminar, donde se integran los componentes del molde tales como: la mazarota, el canal de distribución primario, los canales de distribución secundarios, el punto de inyección, los venteos, los agujeros de la expulsión de las cavidades y los canales de refrigeración.

En los planos de fabricación de las placas se observan las especificaciones técnicas de construcción. A continuación, se observan los cuatro (4) modelos de las placas y posterior se encuentra los planos de construcción de las cuatro (4) placas de inserto del molde.

En la Figura 40, se observa el modelo de placa de insertos del espécimen de la norma ASTM D-256, donde se aprecia la concepción del diseño, los canales de distribución y la forma en la cual se plantea la posición del inserto del espécimen en la placa, las cantidades de especímenes y su forma constructiva para el ajuste cuando se ensamble el molde.

Figura 40. Modelo placa de insertos espécimen D-256



Fuente. Autor

En la Figura 41 se observa el modelo de placa de insertos del espécimen de la norma ASTM D-638 tipo 1. Se observa el diseño final de la placa.

Figura 41. Modelo placa de insertos espécimen D-638 tipo 1



Fuente. Autor

En la Figura 42, se observa el modelo de placa de insertos del espécimen de la norma ASTM D-790. Se observa el diseño final de la placa.

Figura 42. Modelo placa de insertos espécimen D-790



Fuente. Autor

En la Figura 43 se observa el modelo de placa de insertos del espécimen de la norma ASTM D-5420. Se observa el diseño final de la placa.

Figura 43. Modelo placa de insertos espécimen D-5420



Fuente. Autor

A continuación, se encuentran los planos de las cavidades del molde, eso con el fin de tener la documentación centralizada de la forma constructiva.

Plano placa espécimen ASTM D-256. Plano placa espécimen ASTM D-638 tipo 1.  
Plano placa espécimen ASTM D-790. Plano placa espécimen ASTM D-5420.  
Ver **Anexo B** lo planos de construcción total del molde.

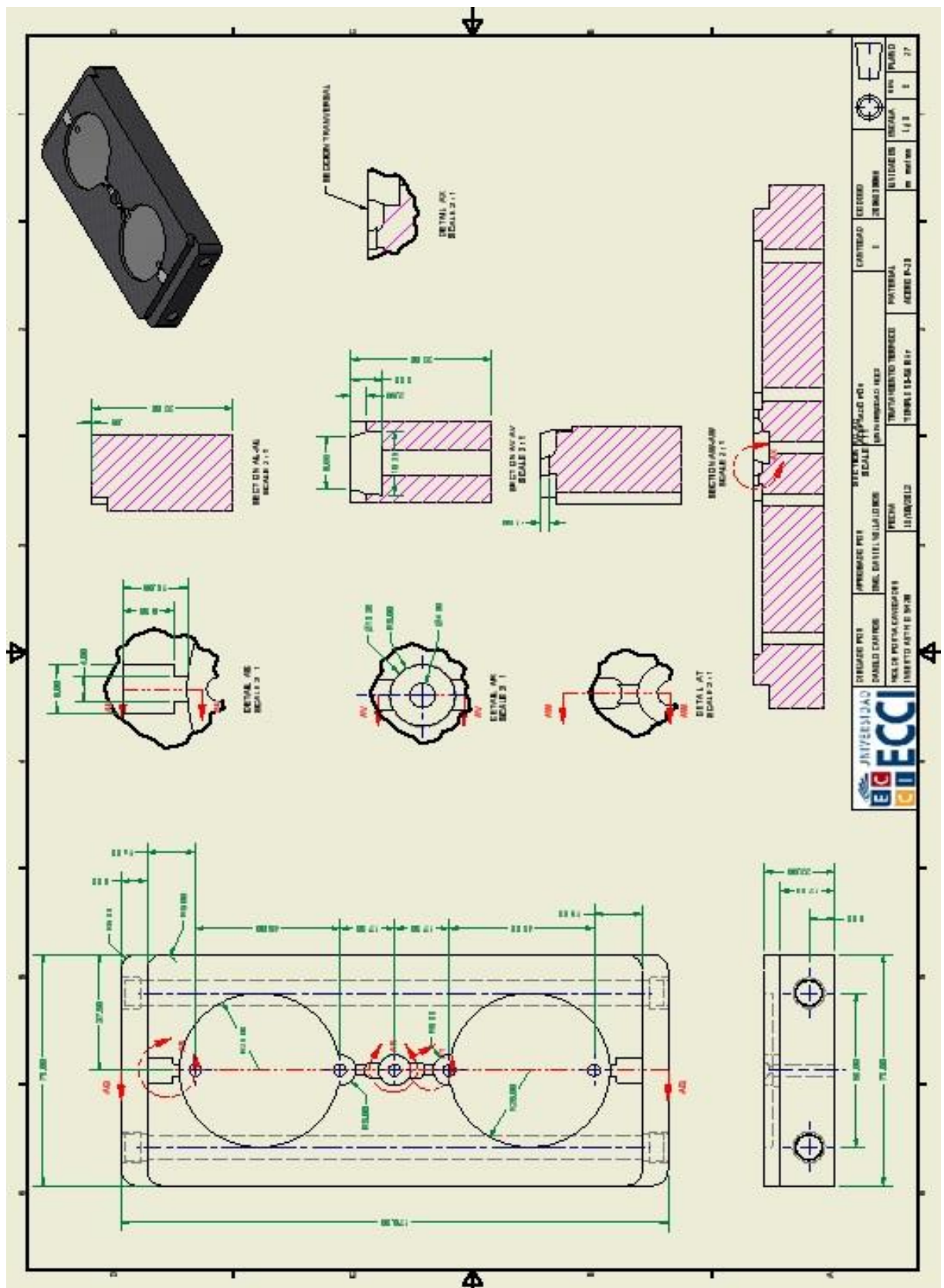












## 5.10 ANÁLISIS MECÁNICO DEL MOLDE POR ELEMENTOS FINITOS.

En esta sección del proyecto se realiza una simulación de esfuerzos del molde mediante el análisis de elementos finitos, donde se realiza con el modelo total del molde, con una parte fija, (la placa fija del molde) y una parte móvil (placa móvil del molde) la cual se le aplica la fuerza de cierre expresada en newton. Este análisis se realiza para verificar los esfuerzos a los cuales será sometido el molde en operación, estos resultados corroboran el diseño mecánico del molde para el mecanizado de sus componentes.

Para iniciar el análisis se establece el tipo de material al cual se le realizará el esfuerzo, este molde estará construido con placas de acero SAE 1045, acero para construcción, y con acero SAE P-20 acero para herramientas. Las placas de acero para herramientas serán las que tienen contacto con el polímero, ya que sus propiedades y características son para esta aplicación, y el acero para construcción será para los componentes del molde que no tienen contacto con el polímero.

El esfuerzo máximo al cual será sometido el molde es de 45 toneladas fuerza. Que es la magnitud de la fuerza de cierre de las placas de la prensa de la máquina de inyección "PLASTIJET EUROMAP 110/45". Una vez establecidos estos parámetros se da inicio al análisis del molde.

Propiedades acero SAE 1045.

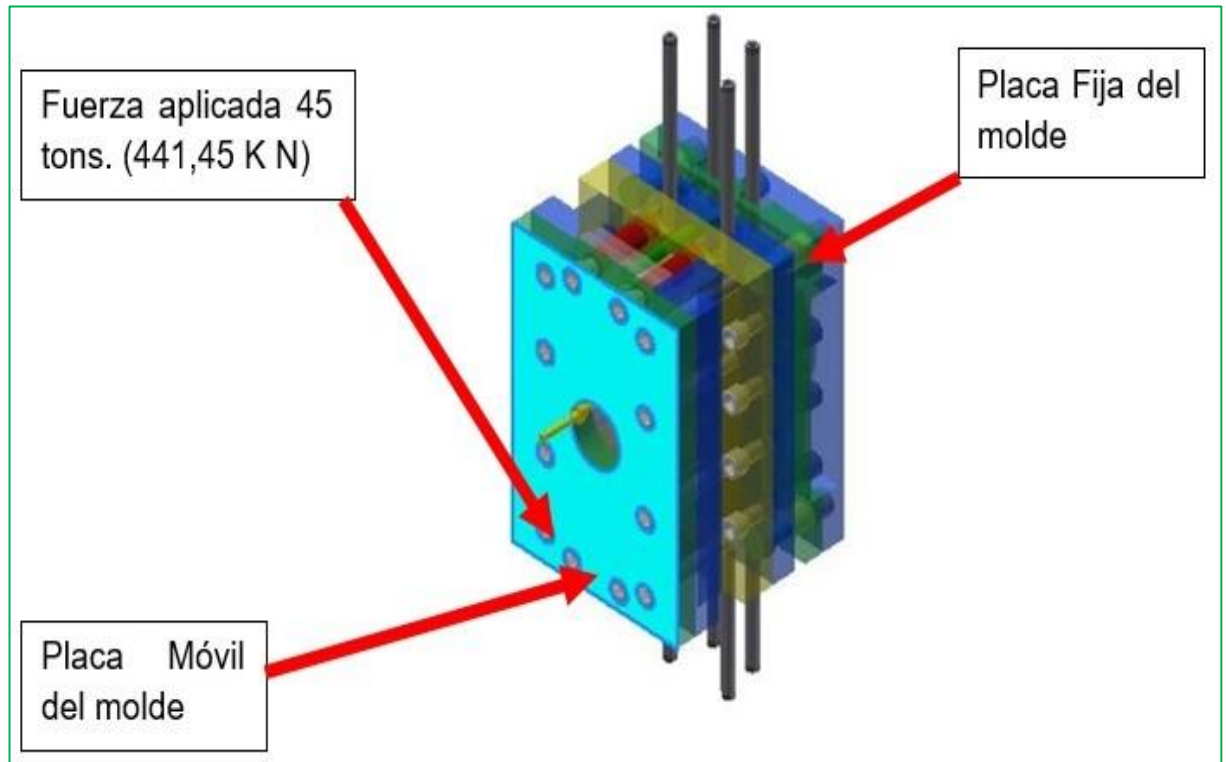
- Esfuerzo de fluencia = 310 MPa
- Esfuerzo Máximo = 565 MPa
- Módulo de elasticidad = 200 GPa

Esfuerzo de maquina

- 45 toneladas. Conversión (441.45 kilo Newton)

En la Figura 44 se establecen las condiciones del análisis del molde, donde la restricción de fijación es la placa fija. La restricción de movimiento está en la placa móvil, y la fuerza aplicada a la placa móvil es de 45 Toneladas o (441.45 KN). Para efectos de ajuste del software las unidades se establecen en kilo Newton.

Figura 44. Modelo aplicación de fuerza de cierre 45 toneladas.



Fuente. Autor

En el análisis de elementos finitos se reflejan los siguientes resultados:

- Esfuerzo de Von Mises (Von Mises Stress)
- Desplazamiento
- Presión de contacto

Los resultados obtenidos en el análisis por elementos finitos indica teóricamente en que parte del elemento puede haber fallas ocasionadas por las fuerzas aplicadas sobre el mismo elemento, en este caso la fuerza aplica es la fuerza de cierre máximo de la prensa de la máquina de inyección, la magnitud es de 45 toneladas o 441,45 kilo newton.

### 5.10.1 Análisis mecánico del molde (fuerza de cierre **45 toneladas**)

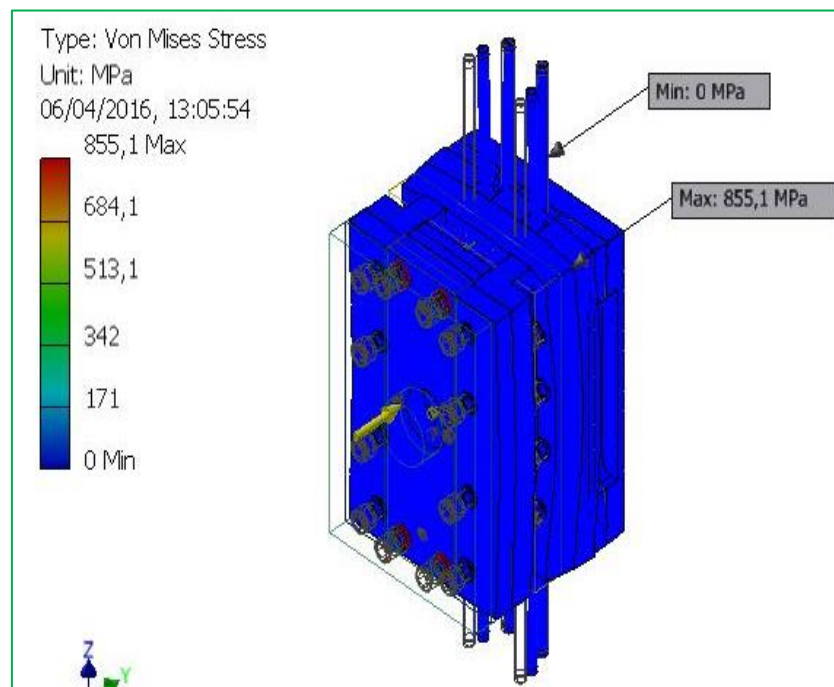
5.10.1.1 Resultado de análisis de esfuerzo de Von Mises (fuerza de cierre 45 toneladas). La teoría de fallas de máxima distorsión estable que un material dúctil puede absorber una determinada cantidad de energía antes de sufrir una falla o romperse.

En la Figura 45, se observa el resultado de análisis por elementos finitos de la teoría de distorsión de Von Mises, la imagen tiene una gama de colores sobre el modelo del molde, indicando los lugares en los que hay mayor y menor esfuerzo resultante del trabajo debido a fuerza de cierre de 45 toneladas.

El resultado indica que el esfuerzo máximo en el molde es de 855.1 MPa y el esfuerzo a la fluencia del acero SAE 1045 es de 310 MPa, indicando los lugares posibles de fallos.

Los lugares señalados con color rojo son los orificios de las cabezas de los tornillos, este lugar es donde el análisis establece el mayor esfuerzo. Para la reducción del esfuerzo en este punto es necesario eliminar los concentradores de esfuerzos resultantes del mecanizado de los orificios.

Figura 45. Resultado Esfuerzo Von Mises (fuerza de cierre 45 toneladas)



Fuente. Autor



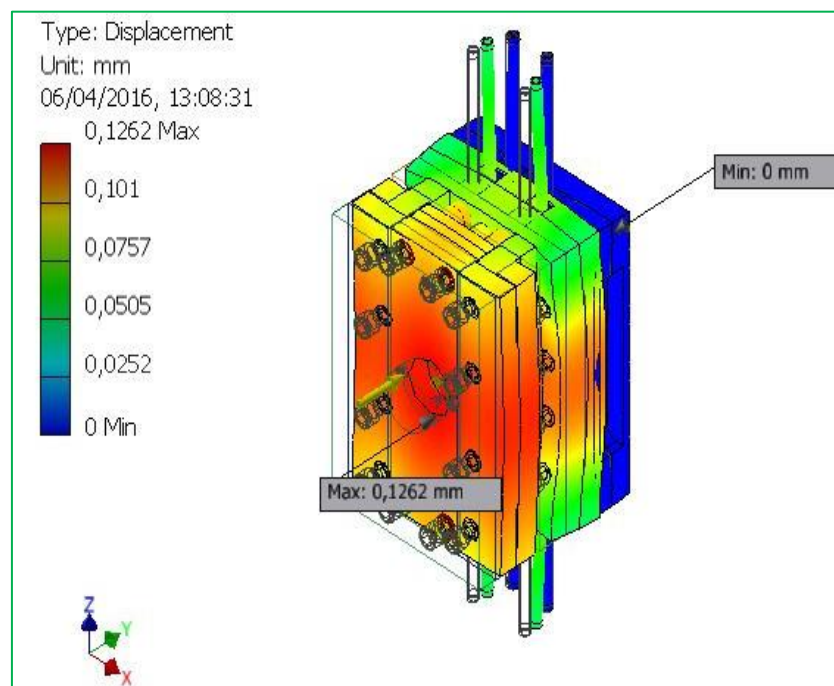
5.10.1.2 Resultado de desplazamiento (fuerza de cierre 45 toneladas). En este análisis se observan las dimensiones y los desplazamientos a los cuales es sometido el molde debido a la fuerza de cierre de la máquina de 45 toneladas.

En la Figura 46, se observa que el desplazamiento mínimo de 0mm se encuentra en la placa fija del molde, y el mayor desplazamiento de 0.1262mm en la zona posterior de la placa móvil, este resultado se interpreta de la siguiente forma.

En el momento en que el molde cierra con fuerza de cierre de 45 toneladas se tendrá un desplazamiento mínimo en la placa móvil, donde el desplazamiento medio está en las superficies de contacto que son las placas de cavidades del molde y las placas de contacto metal polímero, donde la magnitud del desplazamiento es relevante ya que se tienen guías para que el molde encaje con este movimiento.

La cavidad de los especímenes está en la placa móvil del molde y la placa fija del molde es una placa lisa, ya que este molde no se diseñó con líneas de partición en el espécimen.

Figura 46. Resultado desplazamiento (fuerza de cierre 45 toneladas)



Fuente. Autor

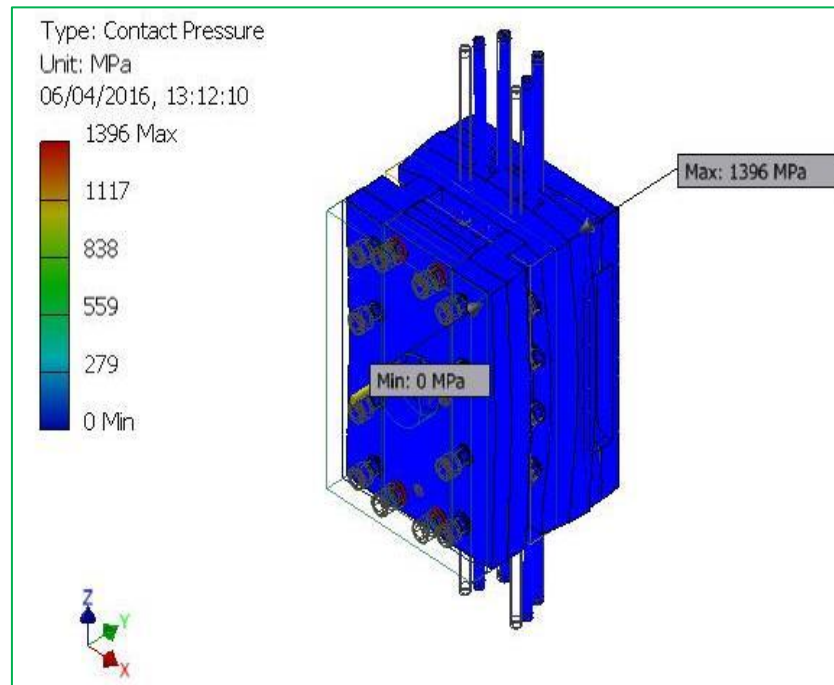
5.10.1.3 Resultado presión de contacto (fuerza de cierre 45 toneladas). Este análisis indica la zona en la cual habra mayor presion de contacto debido a la fuerza de cierre de la maquina, esta zona son las placas de contato metal polimero, la placa de las cavidades del molde y la placa fija.

En la Figura 47, se observan las magmitudes del analisis 1396 MPa, y se realiza la comparacion con la magnitud de esfuerzo maximo de acero SAE 1045 que es de 565 MPa.

El resultado del analisis es superior al esfuerzo maximo del acero SAE 1045 y por lo tanto fallara, y nuevamente indica que los lugares de mayor concentracion de esfuerzo son los agujeros de las cabeza de los tornillos.

En consecuencia es necesario realizar un segundo analisis modificando la fuerza de cierre de inyeccion de la maquina. Este segundo analsis se realizara con el 10% de la magnitud de la fuerza de cierre maxima de la maquina. Para este caso 4,5 toneladas o 44,145 Kn.

Figura 47. Resultado presión de contacto (fuerza de cierre 45 toneladas)



Fuente. Autor

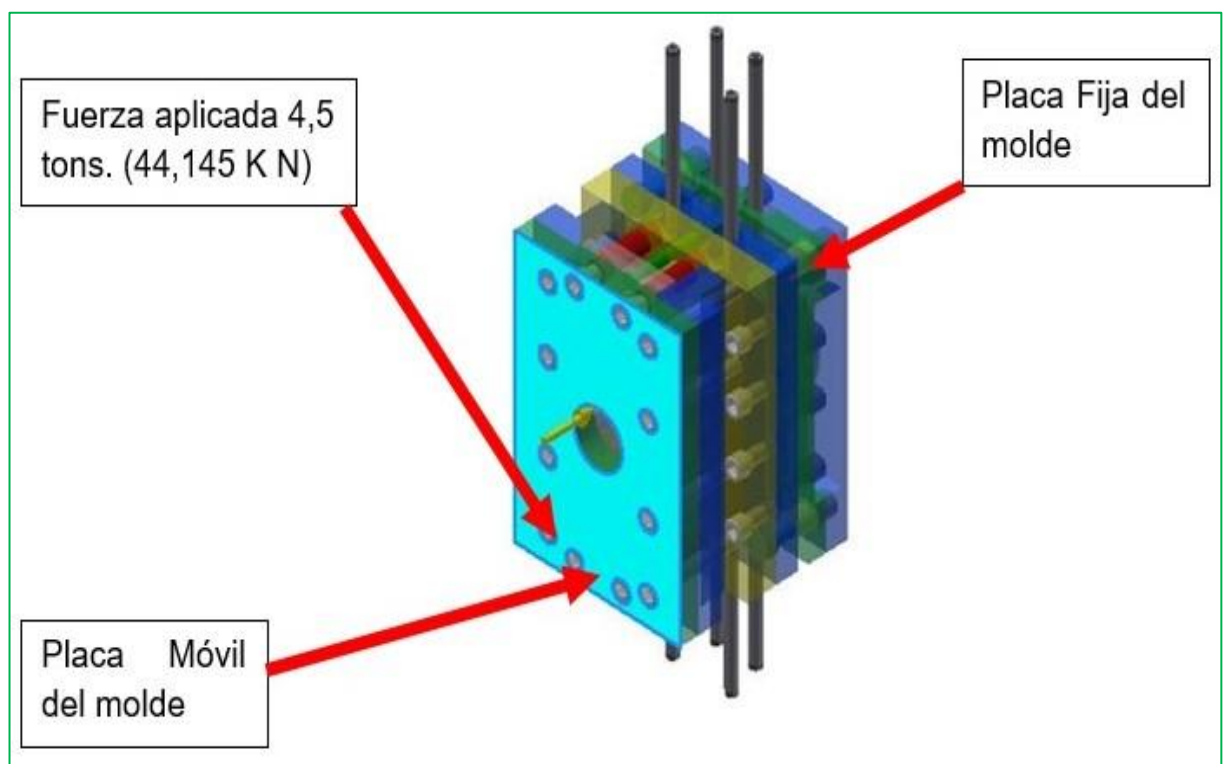
5.10.2 Análisis Mecánico del molde (fuerza de cierre **4,5 toneladas**). En el segundo análisis realizado se toma el 10% del valor máximo de referencia de fuerza de cierre de la máquina.

La restricción es la presión de inyección de la máquina, 120 MPa, y con el resultado de presión de contacto de las placas con fuerza de cierre de 45 toneladas el valor de contacto es de 1369 MPa.

Este resultado es el de mayor relevancia teniendo en cuenta que la presión ejercida por la maquina durante el ciclo de inyección debe ser de 120 MPa. A continuación, se ilustran los resultados gráficamente del análisis de 4,5 toneladas.

En la Figura 48 se establecen las condiciones de simulación del segundo análisis de elementos finitos, ubicando la magnitud del esfuerzo de 4,5 toneladas o 44,145 kilo Newton.

Figura 48. Modelo aplicación de fuerza de cierres 4,5 toneladas



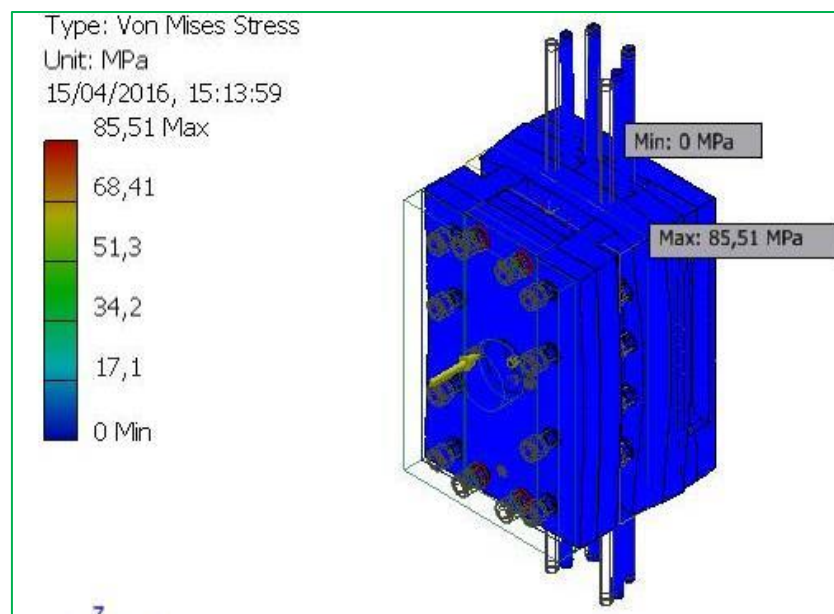
Fuente. Autor



5.10.2.1 Resultado esfuerzo Von Mises con (fuerza de cierre de 4,5 toneladas). El resultado del analisis con fuerza de cierre 45 toneladas es de 855.1 MPa, y el resultado del analisis con fuerza de cierre 4,5 toneladas 85.51 MPa. La disminucion del esfuerzo obedece al 90%.

En la Figura 49, se observa el analisis donde el resultado con la fuerza de cierre de 4,5 toneladas es de 85.81 MPa y que el esfuerzo a la fluencia del acero SAE 1045 utilizado en la construccion de las placas es de 310 MPa. Donde tenemos un factor de seguridad de 3.62. para este caso, el resultado del analisis muestra que el molde es adecuado, y que la fuerza de cierre del molde aplicada durante el proceso de ciclo de inyeccion debe ser de 4,5 toneladas o (44,145 KN).

Figura 49. Resultado Esfuerzo Von Mises (fuerza de cierre 4.5 toneladas).



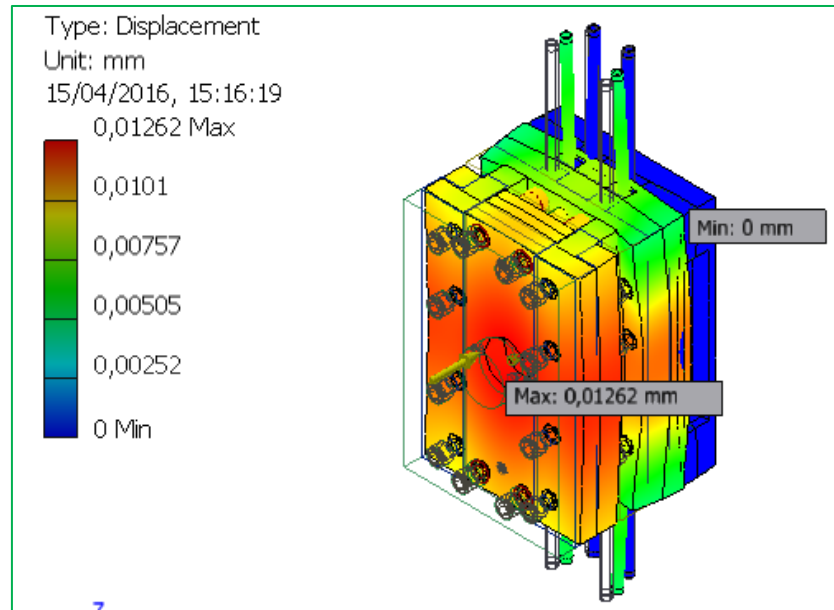
Fuente. Autor

5.10.2.2 Resultado desplazamiento (fuerza de cierre 4,5 toneladas). Este análisis muestra el resultado del desplazamiento que tendrán las placas.

En la Figura 50, se observa que el desplazamiento es de 0.01262 mm, indicando en que este desplazamiento está en placa móvil del molde, este valor es de ajuste entre las placas de contacto y se expresa como el cierre del molde.

En comparación con el análisis de desplazamiento con fuerza de cierre de 45 toneladas se disminuye en 90%. En conclusión, el desplazamiento de las placas es admisible para el cierre y está dentro margen de tolerancia admisible para el proceso de inyección.

Figura 50. Resultado desplazamiento (fuerza de cierre 4.5 toneladas).

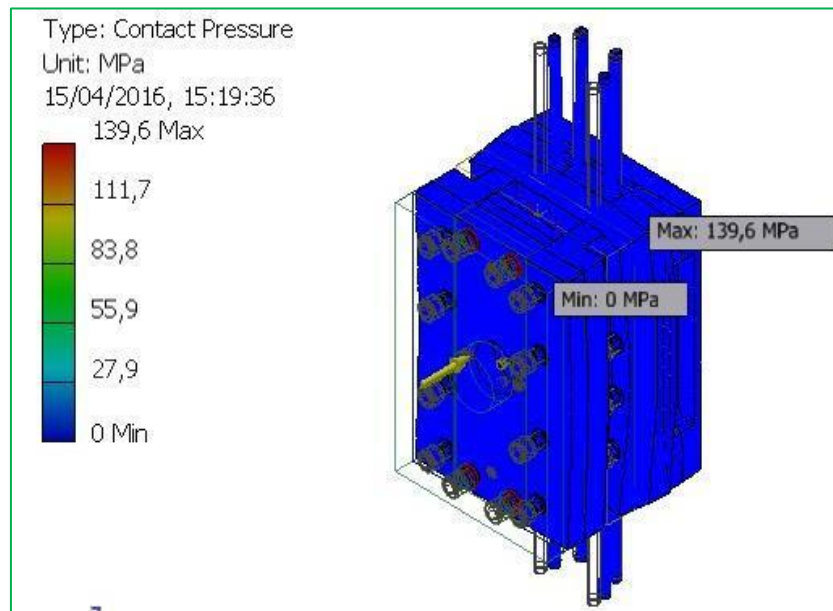


Fuente. Autor

5.10.2.3 Resultado presión de contacto (fuerza de cierre 4,5 toneladas). Este resultado muestra la presión máxima en el molde, resultante de la fuerza ejercida por el cierre de la prensa con 4,5 toneladas.

En la Figura 51 se observa que la máxima presión en los componentes del molde es de 139MPa. Y el esfuerzo máximo permisible para el acero SAE 1045 es de 565 MPa. El factor de seguridad es de 4.06. por lo cual se ratifica que el molde cumple con las condiciones mecánicas de construcción y es adecuado para la máquina para la cual está diseñado, y estableciendo parámetros de fuerza de cierre de 4.5 toneladas (44.145 KN). Este valor es el adecuado para el proceso de inyección con este molde multipropósitos.

Figura 51. Resultado presión de contacto (fuerza de cierre 4.5 toneladas)

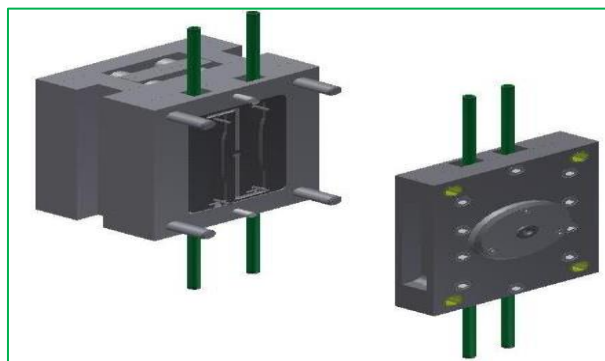


Fuente. Autor

#### 5.11 MODELADO DE LAS PLACAS COMPONENTES DEL MOLDE.

En esta sección se ilustra los componentes mecánicos del molde modelados para realzar los planos de construcción del mismo, ya realizando las modificaciones de acuerdo con los resultados de los puntos críticos de los esfuerzos. En la Figura 52, se observa el modelo total del molde.

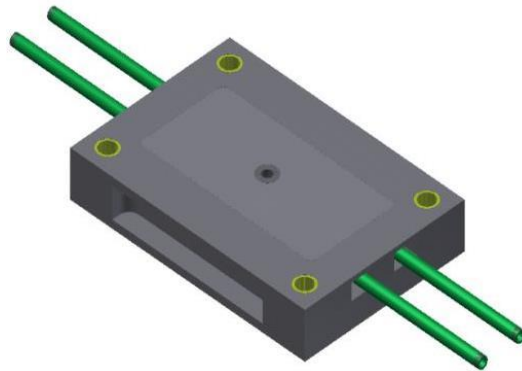
Figura 52. Modelo general del molde



Fuente. Autor

En la Figura 53 se observa la forma constructiva de la placa fija del molde, donde se observan los bujes de alineación de las columnas de la placa móvil del molde, la placa lisa de contacto metal polímero, las placas de contorno y el bebedero que es el lugar por donde ingresa el polímero fundido al molde.

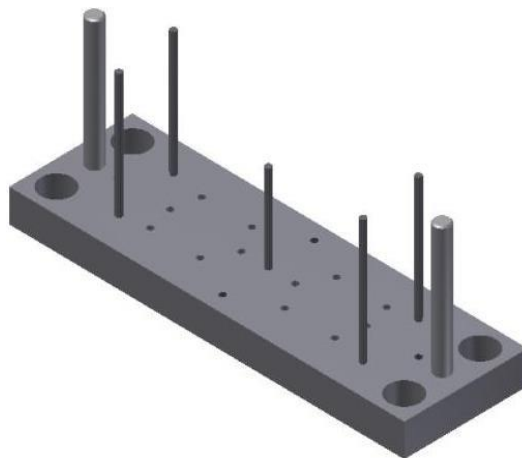
Figura 53. Modelo placa fija del molde



Fuente. Autor

En la Figura 54 se observa la construcción de la placa de expulsión del molde, se observan una serie de agujeros pequeños que son las posiciones de los pines de expulsión dependiendo de la placa de insertos que sea instalada en el molde. También se observan los pines de expulsión en la posición de la placa de especímenes de la norma ASTM D-638 tipo 1. Y se observan los cuatro (4) agujeros de las guías de desplazamiento de la placa de expulsión.

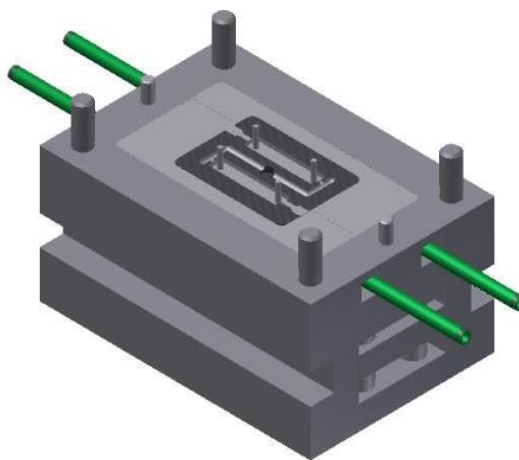
Figura 54. Modelo placa de expulsión.



Fuente. Autor

En la Figura 55, se observa la construcción de la placa móvil, donde se observa la placa de insertos de la norma ASTM D-256 y los componentes de encaje del molde, las columnas guías.

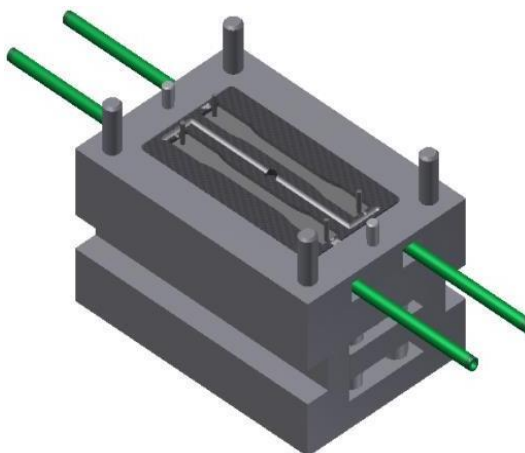
Figura 55. Modelo placa móvil espécimen D-256



Fuente. Autor

En la Figura 56 se observa la construcción de la placa móvil del molde con la placa de especímenes de la norma ASTM D-638 tipo 1.

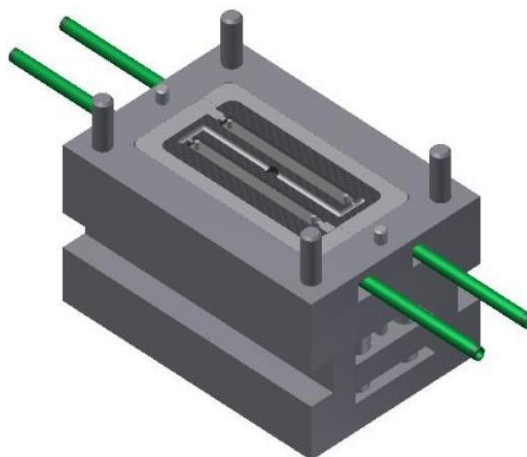
Figura 56. Modelo móvil placa espécimen D-638 tipo 1



Fuente. Autor

En la Figura 57 se observa la construcción de la placa móvil del molde con la placa de especímenes de la norma ASTM D-790.

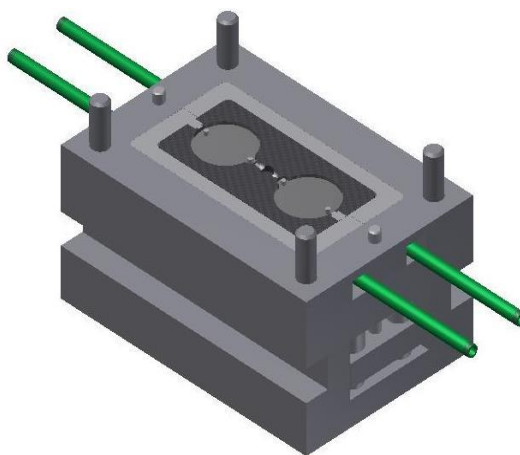
Figura 57. Modelo placa móvil espécimen D-790



Fuente. Autor

En la Figura 58 se observa la construcción de la placa móvil del molde con la placa de especímenes de la norma ASTM D-5420

Figura 58. Modelo placa móvil espécimen D-5420



Fuente. Autor

## 5.12 DISEÑO FINAL SIMULACIÓN EN SOFTWARE MOLDFLOW ADVISER

Este análisis se realiza para el espécimen ASTM D-638 TIPO 1 “Método de prueba estándar para las propiedades de tracción de los plásticos”, donde se establecen los parámetros de presión de inyección de 120 MPa y material Polipropileno. Antes de realizar el análisis se realizan los cálculos de:

5.12.1 Cálculos de inyección. Los cálculos iniciales del ciclo de inyección son realizados para tener un parámetro de inicio en la simulación del software. Los cálculos son: tiempo de inyección y tiempo de enfriamiento.

Para el cálculo de tiempo de inyección, se realiza el cálculo inicial de la capacidad de inyección del material, para este caso específico se calculará el valor de inyección del polipropileno. [17]

5.12.1.1 Calculo capacidad de inyección. La capacidad de inyección para se calcula con la siguiente formula.

$$CIPP = CIPS \times \left( \frac{\text{DensidadB}}{\text{DensidadPS}} \right) \quad (29)$$

Dónde:

CIPP	= Capacidad de inyección del Polipropileno	=
CIPS	= Capacidad de inyección del Poliestireno	= 35-40 Kg/h
Densidad PP	= Densidad del Polipropileno	= 0.90 g/cm <sup>3</sup>
Densidad PS	= Densidad del poliestireno	= 1.05 g/cm <sup>3</sup>

Remplazando:

$$CI(PP) = 9.72 \text{ g/s} \times \left( \frac{0.90 \text{ g/cm}^3}{1.05 \text{ g/cm}^3} \right) \quad (30)$$

$$CI(PP) = 8.33 \text{ g/s} \quad (31)$$

5.12.1.2 Calculo tiempo de inyección. El tiempo de inyección se calcula con la siguiente formula. [17]

$$TI = \left( \frac{P \text{ Pieza ADTM D-638 } T1 \text{ total material Polipropileno}}{CI (PP) \text{ Polipropileno}} \right) \quad (31)$$

Remplazando:

$$TI = \left( \frac{16.81 \text{ g}}{8.33 \text{ g/s}} \right) \quad (32)$$

$$TI = 2.01 \text{ s} \quad (33)$$

5.12.1.3 Calculo de tiempo de solidificación. Para este cálculo se usa la siguiente formula. [17]

$$Ts = \frac{-S^2}{2\pi\alpha} \times \ln \left[ \frac{\pi(Tx-Tm)}{4(Tc-Tm)} \right] \quad (34)$$

Dónde:

Ts	= Tiempo mínimo de enfriamiento.	=
S	= Espesor máximo de la pieza	= 3.2 mm
$\alpha$	= Difusividad térmica del material	= 0.06 mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> / °C
TX	= Temperatura de extracción de la pieza	= 100 °C
Tm	= Temperatura del molde	= 60 °C
Tc	= Temperatura de material fundido	= 300 °C

Remplazando:

$$Ts = \frac{3.2mm^2}{2\pi \times 0.06 \frac{mm^2}{s}} \times \ln \left[ \frac{\pi(100-60)}{4(300-60)} \right] \quad (35)$$

$$Ts = 55.23 \text{ s} \quad (36)$$

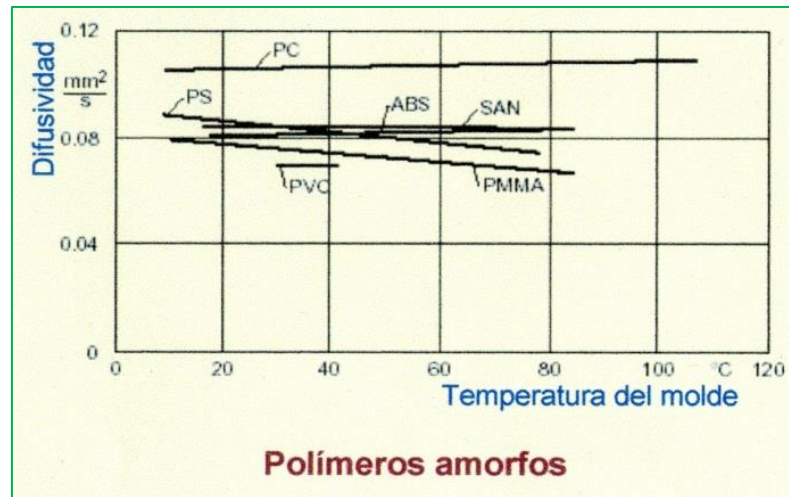
Con la Figura 59 (Polímeros Amorfos) y con la Figura 60 (Polímeros semicristalinos), se obtiene la magnitud de la Difusividad térmica de los materiales



polímeros, y con los valores de temperatura del molde que se encuentran en la Figura 61, se remplazan en las fórmulas para obtener el resultado de tiempos.

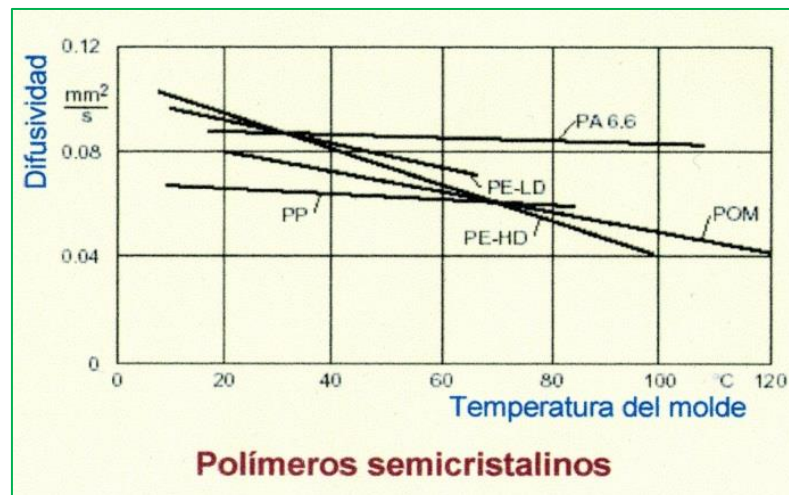
Con la Figura 61, se relacionan los valores de temperatura de desmoldeo, temperatura de material fundido y temperatura del molde de los polímeros para realizar los cálculos de tiempos.

Figura 59. Difusividad térmica polímeros amorfos [22]



Fuente. [22]

Figura 60. Difusividad térmica polímeros semi cristalinos [22]



Fuente: [22]

Figura 61. Temperatura de desmoldeo de polímeros [19]

Material	Temperatura cilindro (°C)	Temperatura desmoldeo (°C)	Temperatura molde (°C)	Contracción (%)
PE-HD	160 - 315	60 - 110	20 - 80	2 – 3
PE-LD	150 - 260	50 - 90	20 - 60	1.5 – 3
PP	200 - 300	60 - 100	20 - 100	1.2 – 2.5
PS	160 - 320	60 - 100	10 - 80	0.5 – 0.7
SAN	200 - 260	60 - 100	40 - 80	0.4 – 0.6
ABS	180 - 320	60 - 100	40 - 85	0.4 – 0.6
PMMA	180 - 260	70 - 110	10 - 80	0.3 – 0.6
PVC-R	150 - 210	60 - 100	20 - 70	0.4 – 0.8
PVC-F	120 - 190	60 - 100	20 - 55	1 – 1.3

Fuente. [19]

Tiempo total de ciclo es la suma de tiempo de inyección + el tiempo de solidificación + el tiempo de ciclo en vacío, este valor corresponde entre 3 y 5 segundos dependiendo del molde. Para este cálculo se usará el valor de 5 segundos.

$$\text{Total} = T_I + T_s + T_v \quad (37)$$

$$\text{Total} = 2.01 \text{ s} + 55.23 \text{ s} + 5 \text{ s} \quad (38)$$

$$\text{Total} = 62.24 \text{ s.} \quad (39)$$

Estos valores de tiempos son comparados con los resultados obtenidos con el análisis realizado con el software Mold Flow, ya que este software es un sistema preciso de elementos finitos.

### 5.13 ANÁLISIS CAE SOFTWARE MOLD FLOW ADVISER. ESPÉCIMEN ASTM D-638 TIPO 1

5.13.1 Análisis de pieza individual. Este proceso de análisis muestra resultados del espécimen en su primera fase, evaluando la viabilidad cosmética del espécimen.

5.13.1.1 Geometría espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Geometry). El análisis de geometría muestra áreas en la pieza que puedan causar problemas durante otros

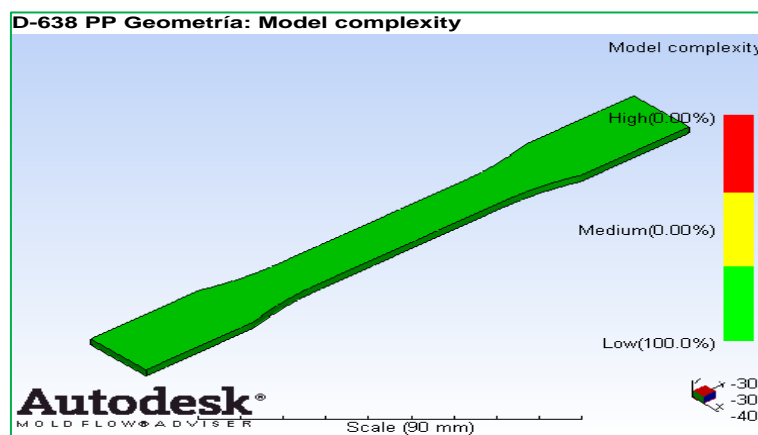
análisis. Este se puede utilizar para comprobar la geometría de un modelo si es grande y complejo, para saber qué características finas como texto y filete o zonas de espesores que pueden causar problemas con otros análisis.

5.13.1.2 Complejidad del modelo espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Model complexity). Con este resultado se encuentran características finas como texto y filetes. Estas características en sí mismas no son un problema, sin embargo, en un modelo grande y complejo, puede ser beneficioso encontrar y eliminar pequeñas funciones cosméticas y complejas del modelo. Esto reducirá en gran medida el tiempo que se tarda en realizar un análisis. Este resultado da una indicación temprana de características que pueden causar problemas antes de realizar un análisis.

El color verde indica áreas geométricas del modelo que tienen baja complejidad. El modelo se llena fácilmente y la calidad es aceptable. El modelo es el adecuado para el análisis, el color amarillo indica características moderadamente complejas, tales como texto o un filete, etc. Se debe considerar el diseño del modelo y llevar a cabo una investigación más detallada de la zona, el color rojo indica altas zonas geométricamente complejas. En áreas donde esto ocurre, el tiempo de ciclo aumentará considerablemente y puede incluso causar problemas de llenado. El modelo será extremadamente difícil de rellenar y su calidad disminuirá.

En la Figura 62 se observa el resultado del análisis de complejidad del modelo, de acuerdo con la escala de valores el resultado demuestra que el modelo es viable para realizar los siguientes análisis, ya que la geometría del modelo no es compleja.

Figura 62. Geometría. Complejidad del molde espécimen ASTM D-638 tipo 1



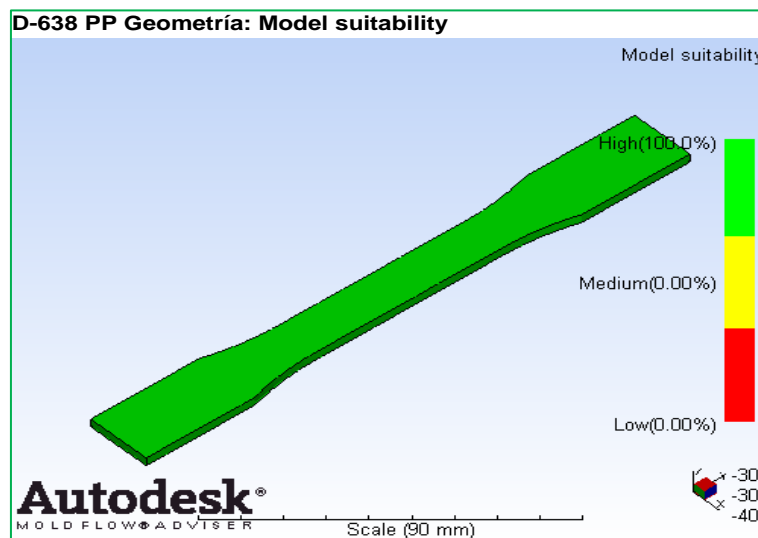
Fuente. Autor

5.13.1.3 Idoneidad del modelo espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Model suitability). El resultado de la idoneidad de modelo busca variaciones de espesor que pueden causar el aumento de tiempo del análisis o la exactitud del resultado para disminuir el tiempo de análisis.

El color verde refleja que el modelo es el adecuado para el análisis, el color amarillo muestra que la calidad no puede ser aceptable. A pesar de que su modelo es el adecuado para el análisis, tiene algunas áreas del modelo que debe considerarse para rediseño incluso represión, el color rojo refleja que disminuye la idoneidad para el análisis.

En la Figura 63, el porcentaje de 100% determina que el modelo es el indicado para seguir con los análisis, ya que no hay variaciones del resultado, este resultado da un punto de partida para replantear el modelo cuando existen algunos colores amarillos y rojos. Para este proyecto el modelo es el indicado.

Figura 63. Idoneidad del modelo (PP ASTM D-638 T1)



Fuente. Autor

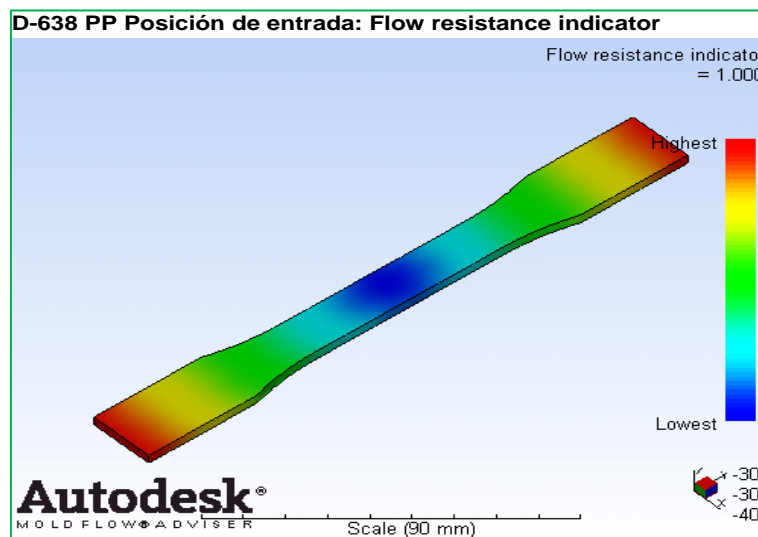
5.13.1.4 Posición de entrada espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Gate location). Tomado desde el software, es el lugar donde automáticamente ubica la posición de entrada del material con mayor fiabilidad de mejoramiento del proceso, por defecto en todos los análisis arroja el centro geométrico de la pieza, sobre la superficie como el lugar indicado para la ubicación de entrada de material a la cavidad.

5.13.1.5 Indicador de resistencia de flujo espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Flow resistance indicator). El indicador de la resistencia del flujo es el resultado que da lugar en el cual el material tiende a fluir con mayor y menor dificultad.

El color azul muestra el lugar en que la restricción de fluir del material es mínima, y el color rojo muestra el lugar en que la restricción de movimiento del material es mayor. Este resultado muestra el movimiento del polímero desde el punto de entrada, basado desde la proyección automática de la entrada a la cavidad de toma el software por defecto. Indica la forma en que llena la cavidad, este resultado muestra la dificultad con la que el polímero tiende a desplazarse dentro de la cavidad, para este caso específico, y de acuerdo con la ubicación actual el polímero tiende a desplazarse dentro de la cavidad sin ninguna interrupción.

En la Figura 64, se refleja que el punto de entrada del material está ubicado en el centro geométrico de la pieza, y muestra la fluidez del polímero dentro de la cavidad para llenarla, este análisis es válido para observar la resistencia del flujo dentro de la cavidad, ya que la entrada de material a la cavidad no es la idónea, porque en este punto se generara un concentrador de esfuerzos y es la restricción inicial de la inyección de los especímenes.

Figura 64. Resistencia de flujo (PP ASTM D-638 T1)



Fuente. Autor

5.13.1.6 Idoneidad de las entradas espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Gating suitability). Análisis de idoneidad de las entradas, indica teóricamente la mejor ubicación de las entradas de material a la cavidad, sin tener en cuenta ningún

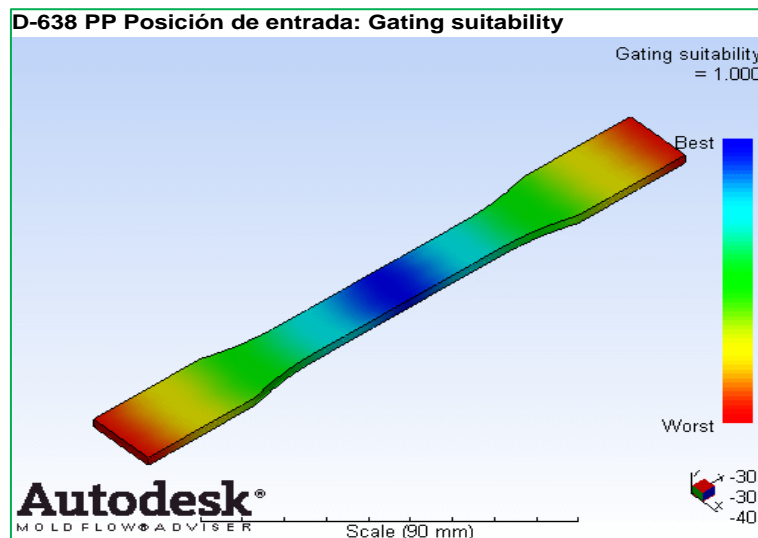
parámetro de restricción de proceso. Esta imagen muestra la entrada de material más efectiva para el proceso de inyección, el lugar por el cual debe entrar el material a la cavidad y llenarla.

La mejor ubicación de la puerta de entrada será en el centro de la pieza, este dato es el resultado del análisis del software.

Partiendo de este análisis, se asigna manualmente la ubicación de la puerta de entrada de material a la cavidad, cumpliendo con las especificaciones requeridas para este caso en específico. “Especimen D-638 Tipo 1”.

El análisis resultante del software indica con colores el mejor lugar de ubicación de la puerta de entrada del material, el color azul indica la posición óptima de entrada de material y el color rojo indica la posición menos favorable para la entrada de material.

Figura 65. Idoneidad de entrada (PP ASTM D-638 T1)

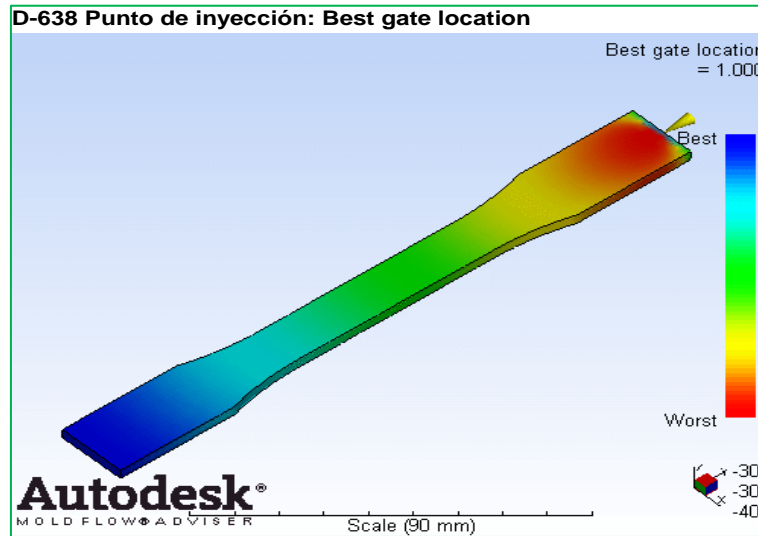


Fuente. Autor

5.13.1.7 Punto de inyección espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Best gate location). La posición óptima de entrada hace referencia al punto de inyección o puerta de entrada del material a la cavidad del molde. Este análisis es el resultado de la ubicación manual del punto de inyección en la pieza, donde se evalúan las restricciones de flujo y el flujo laminar.

En la Figura 66, se observa la corrección del punto de inyección del polímero para la cavidad, y la resistencia del polímero a desplazarse dentro de la cavidad, también se observa los lugares en los cuales tendrá mayor dificultad de llenado.

Figura 66. Punto de inyección (PP ASTM D-638 T1)



Fuente. Autor

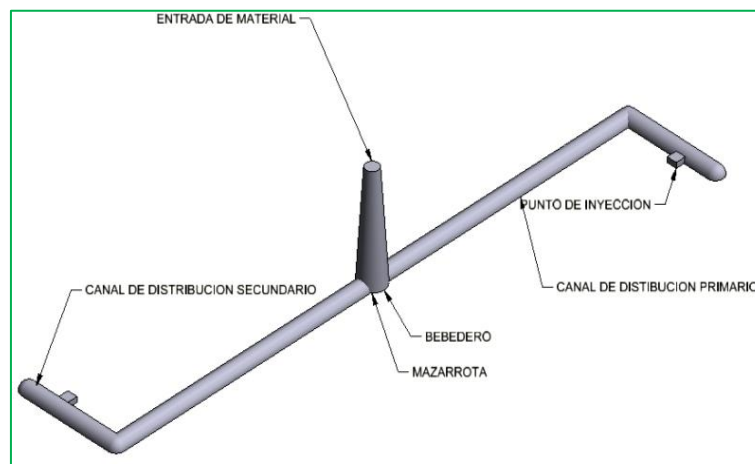
5.13.2 Llenado molde multi-cavidades dos (2) piezas espécimen ASTM D-638 t 1. Para realizar el análisis multicavidades es necesario incluir los parámetros definidos de la construcción del molde, la cantidad de cavidades de especímenes por placa, la distribución geométrica de las cavidades en la placa, las particiones del molde, el bebedero, los canales de distribución, los puntos de inyección y las salidas de gases de las cavidades. Esta geometría es de vital importancia para la construcción de las placas y generar el diseño final del molde con sus correcciones. El valor de calibración de presión de inyección de la máquina para este análisis es de 120 MPa.

En la Figura 67, se observan la forma constructiva del molde, El bebedero de forma cónica, con diámetro menor de 4mm y diámetro mayor de 8mm, con longitud de 61mm. Los canales de distribución primarios y secundarios son de área transversal semicircular de diámetro de 4mm. Al realizar el primer análisis del espécimen con los cinco diferentes materiales polímeros el resultado obtenido es un diámetro mínimo para cada material a inyectar, realizando el segundo análisis y estandarizando el diámetro de mayor valor para los cinco especímenes se



obtienen variaciones de resultados favorables para el proceso de inyección. Se establece que el diámetro de los canales de distribución primarios y secundarios debe ser de 4mm ya que se cuenta con una herramienta estándar para realizar este mecanizado. El punto de inyección es de forma rectangular, ancho de 3mm y profundidad de 1mm, conectando los canales de distribución secundarios con la cavidad de la pieza. Para una pieza que pesa de 5 a 40 gramos la altura recomendada es de 0.5mm donde la base es dos (2) veces la altura y el ancho es tres veces la altura.

Figura 67. Distribución de sistema de llenado de molde



Fuente. Autor

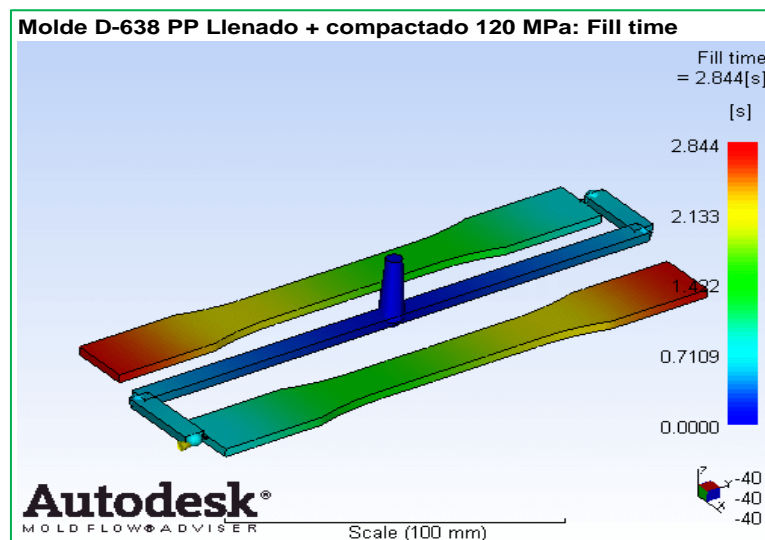
Estableciendo los parámetros anteriormente mencionados, se realiza el análisis posterior y final con los ajustes de condiciones de inyección de máquina. Los valores de los parámetros obtenidos en este análisis son el punto de partida para la inyección de los especímenes, estos valores pueden variar dependiendo de cada máquina de inyección en la cual se puedan realizar pruebas y/o producción de los especímenes, teniendo en cuenta parámetros de refrigeración, presión de inyección y escalas de temperatura ajustadas a cada máquina en específico.

5.13.2.1 Tiempo de llenado espécimen ASTM D-638 tipo 1. (fill time). El resultado tiempo de llenado muestra la posición del frente de flujo a intervalos regulares a medida en que el polímero llena la cavidad del molde desde la entrada al bebedero hasta el llenado total de la cavidad.



En la Figura 68, se muestra el valor de llenado de las dos (2) cavidades del molde con es espécimen ASTM D-638 tipo 1, este resultado es de 2.844 segundos, el valor calculado es de 2.017 segundos, esta diferencia de 0.827 segundos es consideración, por lo cual se establece que el tiempo de inyección se referenciara con el análisis realizado.

Figura 68. Tiempo de llenado (PP ASTM D-638 T1)



Fuente. Autor

5.13.2.2 Flujo del plástico espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Plastic Flow). El resultado es una representación diferente del resultado de tiempo inyección. El flujo de plástico muestra el comportamiento del material desde el momento en que entra al molde, iniciando desde el bebedero hasta llenar las cavidades en su totalidad.

En este análisis se toma la presión de graduación de inyección de 120 MPa, en base a este valor se obtiene el resultado satisfactorio del llenado total de la pieza. Este proceso se observa en las siguientes imágenes.

En la secuencia de la Figura 69 a la Figura 74, se observa el comportamiento del material fluyendo dentro del molde, haciendo el llenado de las cavidades.

Basados en este análisis se ratifica que el flujo del polímero dentro de la cavidad es de forma laminar. Esta función del flujo es una de las restricciones para la construcción del molde.

Figura 69. Entrada del polímero fundido

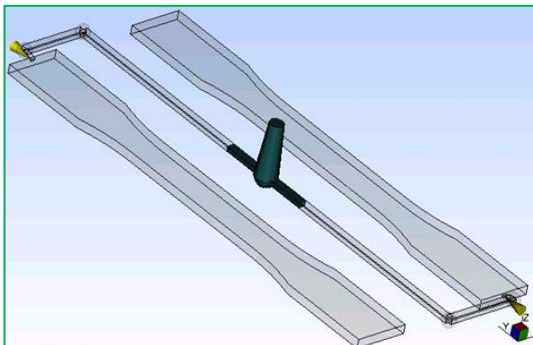


Figura 72. Desplazamiento del polímero fundido dentro de la cavidad

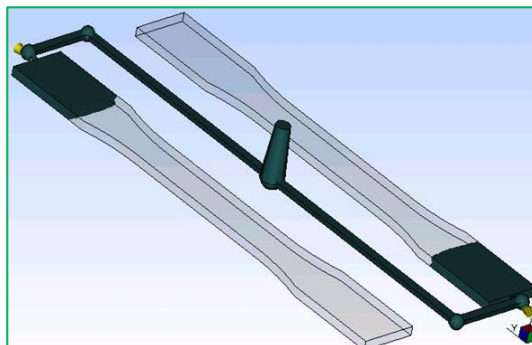


Figura 70. Llenado de canales primarios y secundarios del molde

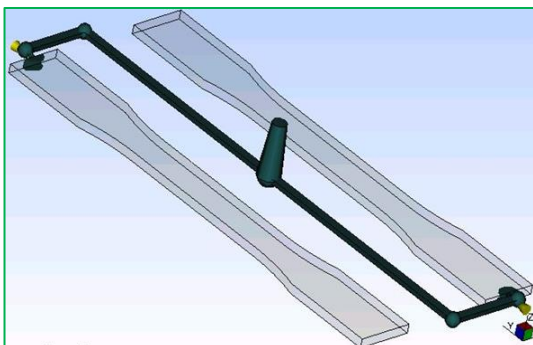


Figura 73. Desplazamiento requerido para adoptar la forma de la cavidad

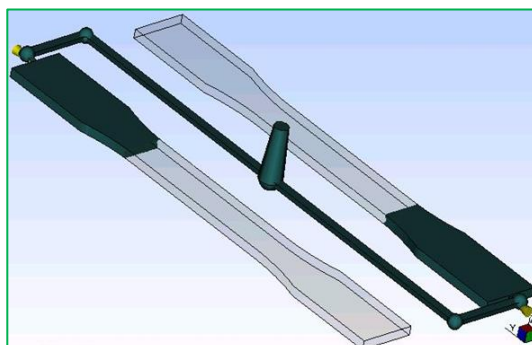


Figura 71. Paso el polímero fundido por el punto de inyección

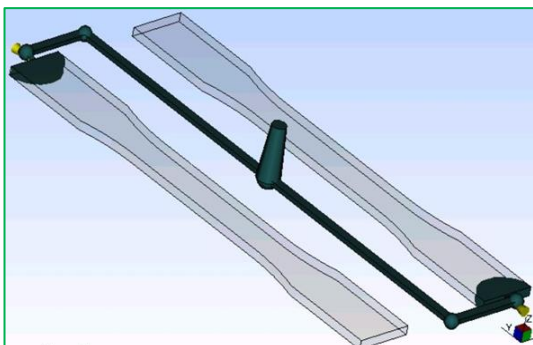
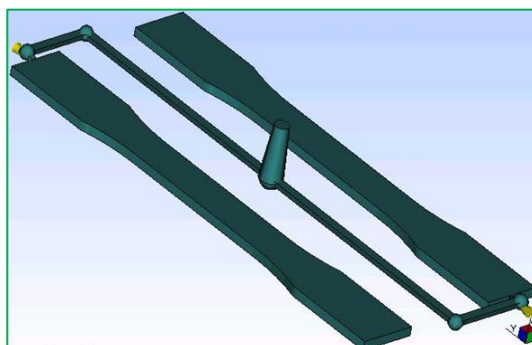


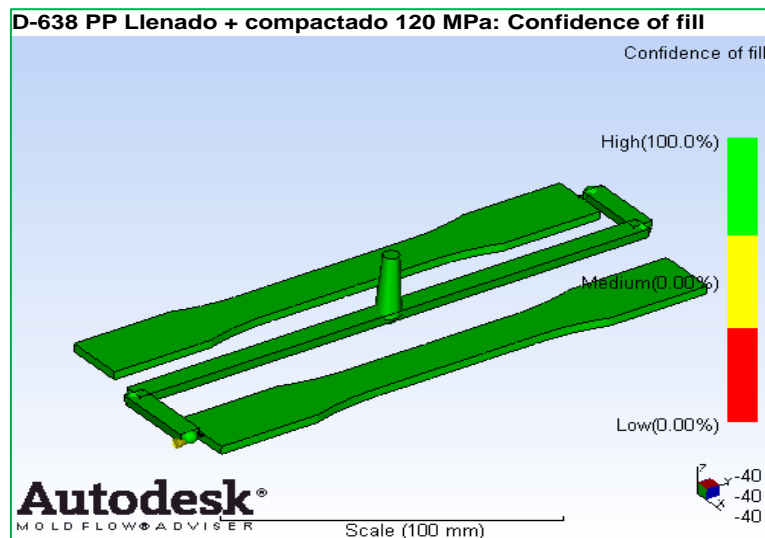
Figura 74. Cavidad llena totalmente por el polímero fundido



5.13.2.3 Confianza de llenado espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Confidence of fill). Este resultado muestra la probabilidad de llenado del polímero en una región dentro de la cavidad bajo condiciones de inyección convencional. Este resultado se deriva de los resultados de presión de inyección de la maquina seleccionada (120 MPa) y temperatura establecida de inyección del polímero seleccionado (Polipropileno).

En la Figura 75, se observa que las cavidades se llenaran en su totalidad, este análisis ratifica que la presión de inyección de 120 MPa seleccionada es la indicada para el proceso.

Figura 75. Confianza de llenado (PP ASTM D-638 T1)

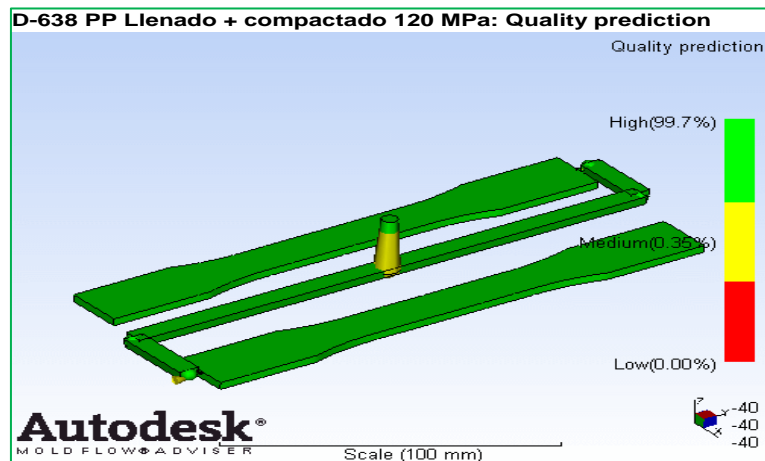


Fuente. Autor

5.13.2.4 Predicción de la calidad espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Quality prediction). El resultado de la predicción de calidad estima la calidad esperada de la apariencia de la pieza y sus propiedades mecánicas. Este resultado se deriva de la presión, temperatura y otros resultados.

En la Figura 76, se observa que resultado del análisis muestra la probabilidad de fallos es del 0.35%, este valor no es consideración, estos defectos se pueden corregir ajustando los valores de taraje de la maquina en el momento de realizar las pruebas y/o producción de los especímenes. Por otra parte, muestras que los defectos no se encuentran en la pieza, que los defectos posibles de la inyección están el sistema de alimentación y distribución de material dentro de la placa de cavidad.

Figura 76. Predicción calidad (PP ASTM D-638 T1)

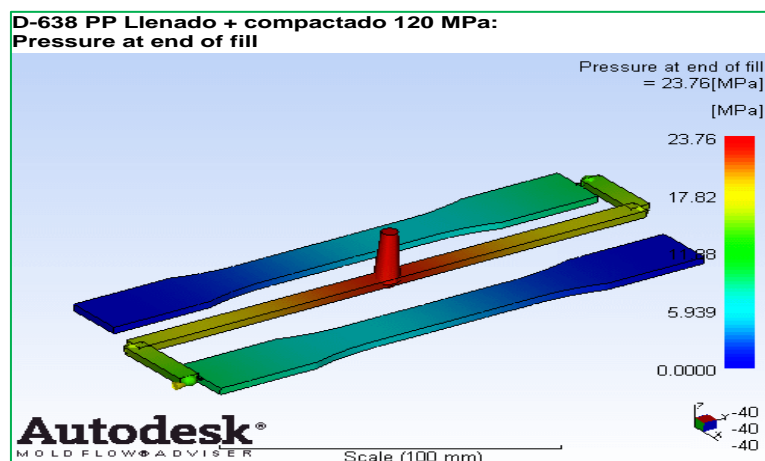


Fuente. Autor

5.13.2.5 Presión al final del llenado espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Pressure at end of fill). El resultado de la presión final de relleno muestra el valor de presión de inyección máxima durante la fase de llenado.

En la Figura 77, el resultado indica la presión a la cual estará sometida la cavidad del molde durante el llenado de la misma. El resultado de presión máxima es de 23.76 MPa, esta presión es la que soportara la placa de los especímenes.

Figura 77. Presión final llenado (PP ASTM D-638 T1)

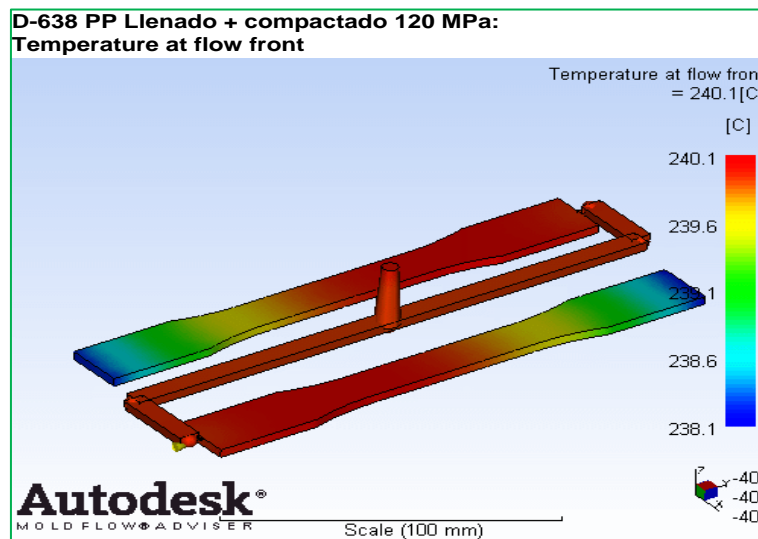


Fuente. Autor

5.13.2.6 Temperatura en el frente del flujo espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Temperature at Flow front). La temperatura del frente del flujo no debe caer más de (2°C a 5°C) durante la fase de llenado. Los cambios más grandes a menudo indican que el tiempo de inyección es demasiado bajo, o que hay zonas de fluctuación.

En la Figura 78, se muestra el resultado de temperatura de la masa fundida (Polipropileno), la fluctuación de temperatura es de 2 grados durante el llenado de la cavidad, estos valores muestran que la cavidad del espécimen tiene una velocidad de llenado adecuada y que no tiene zonas de difícil acceso. La variación de temperatura está dentro de los márgenes permitidos de tolerancia.

Figura 78. Temperatura frente flujo (PP ASTM D-638 T1)

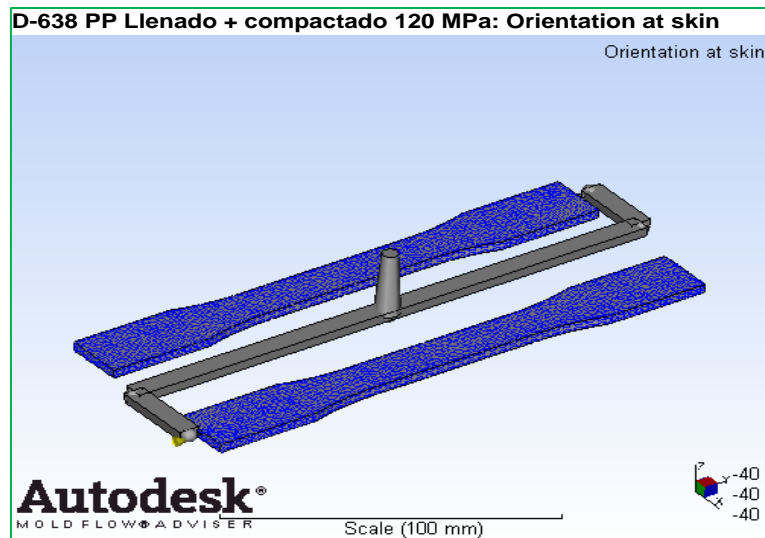


Fuente. Autor

5.13.2.7 Orientación de la superficie espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Orientation at skin). El resultado de la orientación en la superficie de la cavidad del molde muestra una buena imagen de cómo serán orientadas las moléculas en el exterior de la pieza, mostrando la dirección de la alineación principal promedio para el conjunto.

La Figura 79 muestra el llenado de la cavidad y ratifica que el punto de inyección es el indicado, mostrando la orientación laminar del polímero dentro de la cavidad del molde.

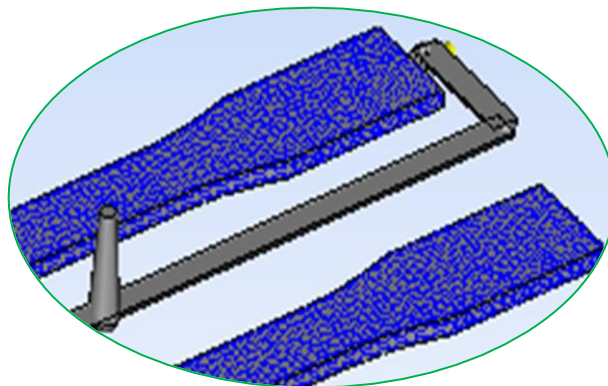
Figura 79. Orientación de superficie (PP ASTM D-638 T1)



Fuente. Autor

En la Figura 80, se observa en mayor detalle la distribución homogénea del material a lo largo del espécimen, notando que el fluido laminar de la pieza es correcto y que no hay concentradores de esfuerzo a lo largo del espécimen.

Figura 80. Detalle orientación de superficie ASTM D-638 T1



Fuente. Autor

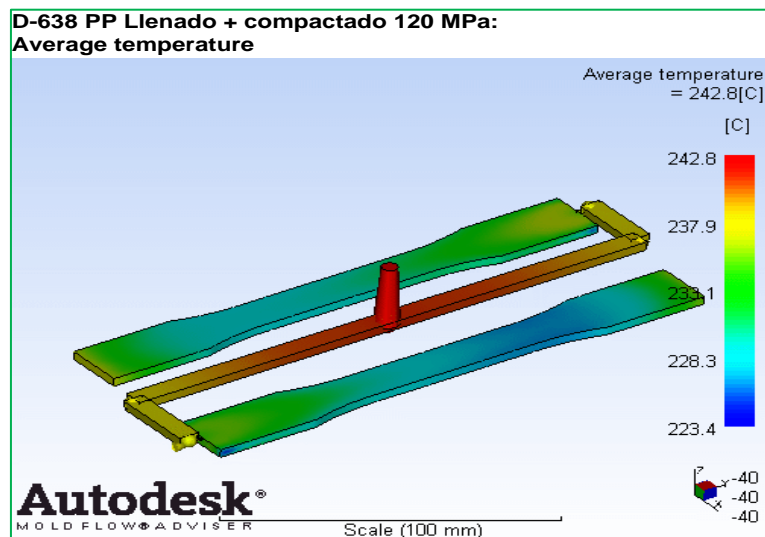
5.13.2.8 Temperatura media espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Average Temperature). El resultado muestra la temperatura promedio masiva a través del espesor de la parte final del llenado.

La temperatura del polímero derretido, realiza cambios no sólo con el tiempo y ubicación, sino también con el espesor durante el ciclo completo por inyección. Es difícil ilustrar todos estos cambios en una sola imagen, por lo que se utiliza la temperatura media para indicar su peso en todo el espesor. La temperatura media representa la energía que es transportada a través de una ubicación determinada en un momento determinado.

Los problemas se indican en el contorno de la temperatura media durante el llenado. Los puntos calientes son debido al excesivo calentamiento viscoso durante la etapa de llenado. Para reducir este efecto, la temperatura media debe estar dentro del rango de temperatura recomendada para el polímero que está utilizando. También pueden considerar el rediseño de la geometría de la pieza cerca de la zona activa o cambiar las condiciones del proceso.

En la Figura 81, el resultado indica la temperatura máxima es de 242.8 °C y que la temperatura mínima es de 223.4 °C, los valores de temperatura obtenidos en este resultado están dentro de los parámetros establecidos para la curva de temperatura de inyección del Polipropileno. Los valores para el Polipropileno son de 280°C máximo y 220°C mínimo.

Figura 81. Temperatura media (PP ASTM D-638 T1)



Fuente. Autor

5.13.2.9 Fracción en la capa solidificada al final del llenado espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Frozen layer fraction at end of fill). El resultado representa la fracción del espesor de la capa solidificada al final de llenado, oscila entre 0.0 y 1.0. Un valor más alto indica una capa más gruesa solidificada y mayor resistencia al flujo. Un polímero se considera solidificado cuando la temperatura cae por debajo de la temperatura de transición ( $T_{trans}$ ).

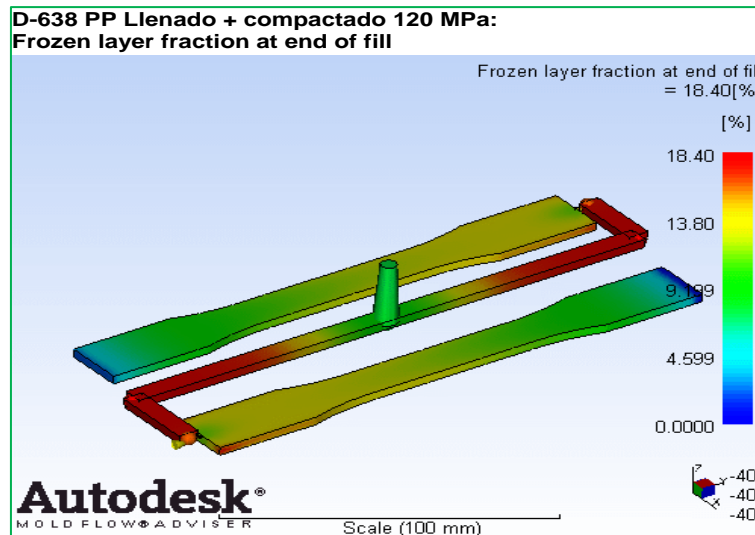
Durante el llenado, la capa solidificada debe mantener un espesor constante para esas zonas con flujo continuo, debido a la pérdida de calor en la pared del molde esta es equilibrada por el calor del flujo derretido aguas arriba.

Una vez detenido el flujo, la pérdida de calor a través del espesor es completamente dominante en esa zona. El resultado es un rápido aumento en el espesor de la capa solidificada.

La fracción de la capa solidificada tiene efectos muy importantes sobre la resistencia de flujo, la viscosidad aumenta exponencialmente con la disminución de la temperatura. También se reduce el espesor de la capa de flujo, así como el espesor de la capa solidificada aumenta.

En la Figura 82, se muestran que la solidificación de la pieza empieza desde el final del llenado, hasta la entrada del material al molde.

Figura 82. Capa solidificada (PP ASTM D-638 T1)



Fuente. Autor



5.13.2.10 Atrapamiento de aire espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Air Traps). Este resultado muestra una fina línea continua donde es probable que se produzca un atrapamiento de aire.

Un atrapamiento de aire es donde se funden y comprime una burbuja de aire o gas entre dos o más frentes de flujo convergente, o entre el frente de flujo y la pared de la cavidad. Normalmente, el resultado es un pequeño orificio o una mancha en la superficie de la pieza. En casos extremos, la compresión aumenta la temperatura a un nivel que causa que el polímero se degrade o se queme.

Los atrapamientos de aire son a menudo causados por efectos de pista o variación, estos problemas suelen desembocar en frentes de flujo convergente.

En la Figura 83, se observa el lugar en el cual la posibilidad de atrapamiento de aire es mayor, esta zona corresponde al final de llenado en la cavidad, esto efecto es generado por el desplazamiento del polímero.

En la Figura 84, se observa en detalle el mecanizado que se debe realizar en la placa para que el aire fluya y no tener problemas de inyección debido a la acumulación de aire.

Figura 83. Atrapamiento de aire (PP ASTM D-638 T1)

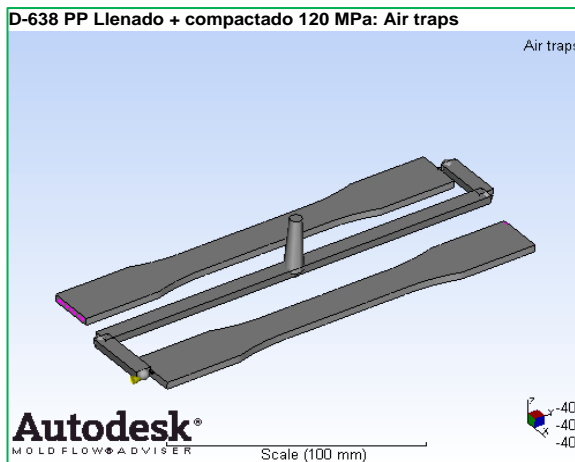


Figura 84. Detalle de salida de aire placa ASTM D-638 T1

Fuente. Autor

### 5.13.3 Compactado molde multi-cavidades dos (2) piezas espécimen ASTM D-638 t 1

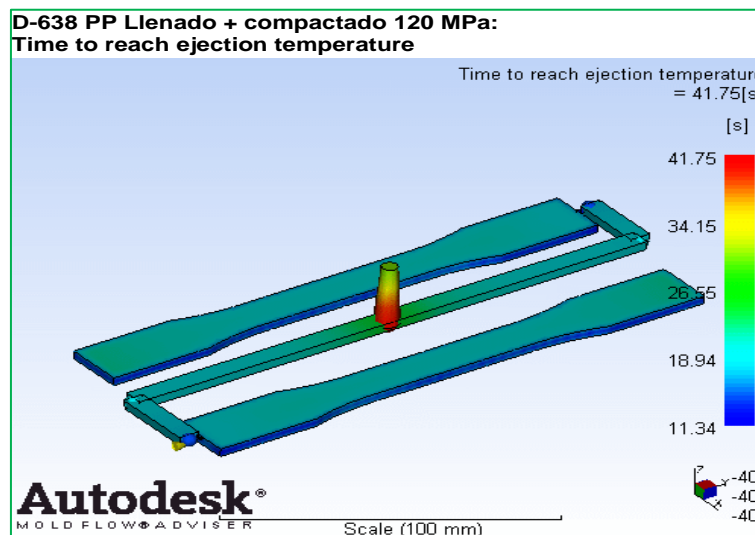
5.13.3.1 Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Time to reach ejection Temperature). Este resultado muestra el tiempo de solidificación para alcanzar la temperatura de expulsión, medido desde el fin del relleno.

Este resultado toma en cuenta la dinámica de la fase de compactado y que nuevo material caliente entra en la cavidad. Este nuevo material caliente afecta al tiempo de enfriamiento. Idealmente, la pieza debe solidificar uniformemente.

En la Figura 85, se observan las áreas de diferentes colores del proceso en enfriamiento, esto para identificar visualmente el lugar en que enfría con mayor velocidad y el lugar que enfría con menor velocidad. Las áreas sombreadas de color azul tienen un menor tiempo de enfriamiento y las áreas sombreadas de color rojo tiene un mayor tiempo de enfriamiento.

En cálculo realizado arroja un valor de 55.23 segundos, y el valor del análisis es de 41.75 segundos, estos valores indican que la última parte en solidificar es el bebedero y que solidificara uniformemente, para efectos de calibración de máquina se tomara como valore de referencia el análisis.

Figura 85. Tiempo temperatura expulsión (PP ASTM D-638 T1)



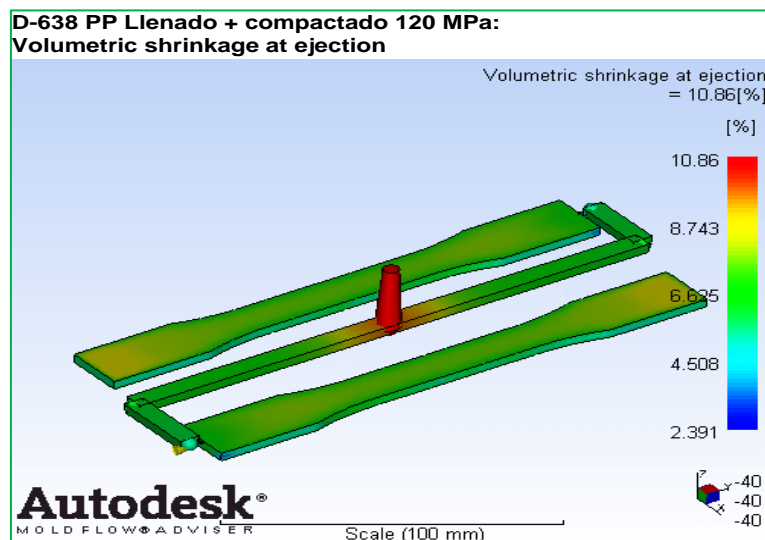
Fuente. Autor

5.13.3.2 Contracción volumétrica en la inyección espécimen ASTM D-638 tipo 1. (Volumetric shrinkage at ejection). Este resultado muestra la contracción volumétrica para cada área como un porcentaje del volumen original.

La contracción volumétrica de inyección es la disminución del volumen total, desde el tiempo final de inyección hasta cuando la pieza ha enfriado a la temperatura ambiente de referencia (el valor predeterminado es 25°C / 77°F).

En la Figura 86, se observa los valores de contracción que tendrá la pieza, la menor contracción está en las paredes del molde y la mayor contracción está en el bebedero de ingreso de material parte de la inyección que no afecta la pieza, la contracción volumétrica general estará entre 4.508% y el 8.743%, con estos valor se pueden establecer parámetros para las piezas inyectadas, donde tendrán una tolerancia máxima y mínima para la aceptación de calidad.

Figura 86. Contracción volumétrica (PP ASTM D-638 T1)

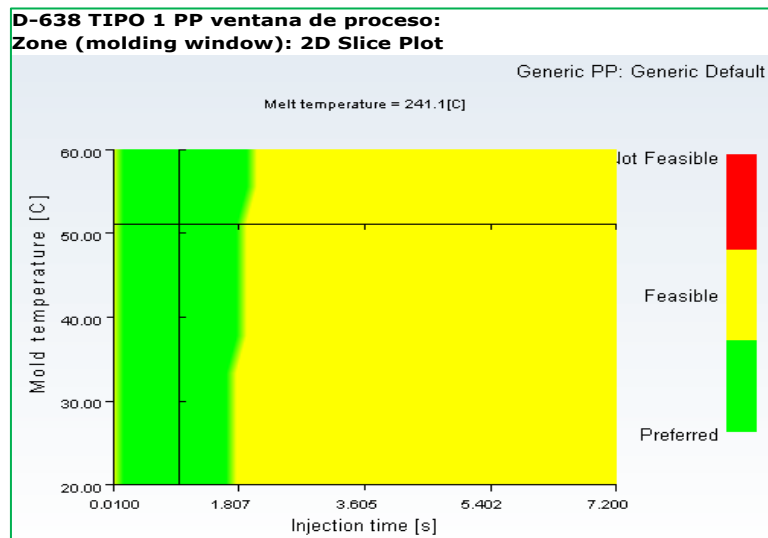


Fuente. Autor

#### 5.13.4 Ventana de proceso espécimen ASTM D-638 tipo 1.

La ventana de proceso como se muestra en la Figura 87, establece los rangos de temperatura de la masa fundida, la temperatura del molde y el tiempo de inyección dentro de los rangos favorables para el proceso, se indica en la figura el rango favorable para este proceso con las condiciones de presión y temperatura establecidas inicialmente.

Figura 87. Ventana de proceso (PP ASTM D-638 T1)



Fuente. Autor

#### 5.13.5 Tabla de valores relevantes para el ciclo de inyección.

La Tabla 11, representa los valores de los análisis realizados para el ciclo de inyección del espécimen ASTM D-638 tipo 1. Estos valores cumplen con la gama de los cinco (5) polímeros seleccionados.

En este proyecto se muestra el análisis de un (1) espécimen ASTM D-638 tipo 1 y un (1) polímero (Polipropileno).

Los valores de tablas finales para inicio de ciclo se muestran en el **Anexo C** donde se encontrarán las tablas para los especímenes ASTM D-256, ASTM D-790 Y ASTM D-5420. Con los valores de programación de la máquina para realizar los diferentes ciclos y procesos.

Tabla 12. Valores relevantes de inyección espécimen D-638 tipo 1

Resultados análisis moldflow adviser 2010 Espécimen ASTM D-638 tipo 1						
materiales de analisis	Popipropileno	Poliestireno	polietileno de alta densidad	Polietileno de baja densidad	Poliamida 66	unidades
<b>Geometria</b>						
1 idoneidad del modelo alta	100	100	100	100	100	%
<b>Ventana de proceso</b>						
2 Temperatura del molde	51.11	58.89	51.11	58.89	77.11	°C
3 Temperatura del masa fundida	241.10	221.00	211.00	231.00	295.00	°C
4 Tiempo de inyeccion	0.96	0.92	1.10	0.69	0.55	segundos
<b>Llenado</b>						
5 Tiempo de llenado	2.84	2.21	2.59	1.67	1.34	segundos
6 Confianza de llenado alta	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	%
7 Predicción de la calidad alta	99.65	100.00	99.30	98.69	100.00	%
8 Presión al final de llenado	23.76	43.43	50.39	31.31	43.01	Mpa
9 Temperatura en el frente del flujo máximo y mínimo	241.10	220.80	211.50	220.40	296.90	°C
	238.10	219.60	209.80	219.10	295.00	°C
10 Temperatura media máxima y mínima	242.80	224.60	215.70	222.90	298.90	°C
	223.40	200.10	199.20	208.20	293.70	°C
11 Fracción de capa solidificada al final del llenado	18.40	10.80	21.79	11.09	38.84	%
<b>Comptado</b>						
12 Tiempo real de llenado	2.85	2.21	2.54	1.67	1.34	segundos
13 Presion real de inyeccion	23.76	43.43	50.39	31.31	43.01	Mpa
14 Peso total de la pieza al final del llenado	12.96	16.19	13.18	13.34	20.84	
15 Volumen de inyeccion	22.70	19.37	19.29	19.30	19.30	cm³
<b>Ciclo de inyeccion</b>						
16 Compactacion	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	segundos
17 Refrigeracion	8.75	10.00	2.50	6.25	0.00	segundos
18 Molde Abierto	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	segundos
19 Tiempo del ciclo	26.60	27.17	20.01	22.90	16.33	segundos
20 Tiempo max	14.75	24.25	14.75	20.75	8.85	segundos
	11.34	7.38	6.37	7.36	2.85	segundos
21 contra vol max	10.86	6.41	12.10	11.15	10.08	%
	2.39	0.31	1.22	2.45	3.68	%
22 Fuerza max	8.77	10.56	18.48	10.74	16.34	Toneladas
23 Peso total pieza	18.72	18.80	16.62	16.10	24.68	Gramos

Fuente. Autor

## 5.14 ESPECIFICACIONES DE FABRICACIÓN PLANOS CONSTRUCCIÓN

El conjunto de planos emitidos para la construcción del molde establece los parámetros y especificaciones de fabricación.

- Dimensiones de las placas, largo, ancho y alto.
- Separación entre especímenes.
- Geometría detallada de las placas del molde.
- Tratamientos térmicos.
- Ensamble general.

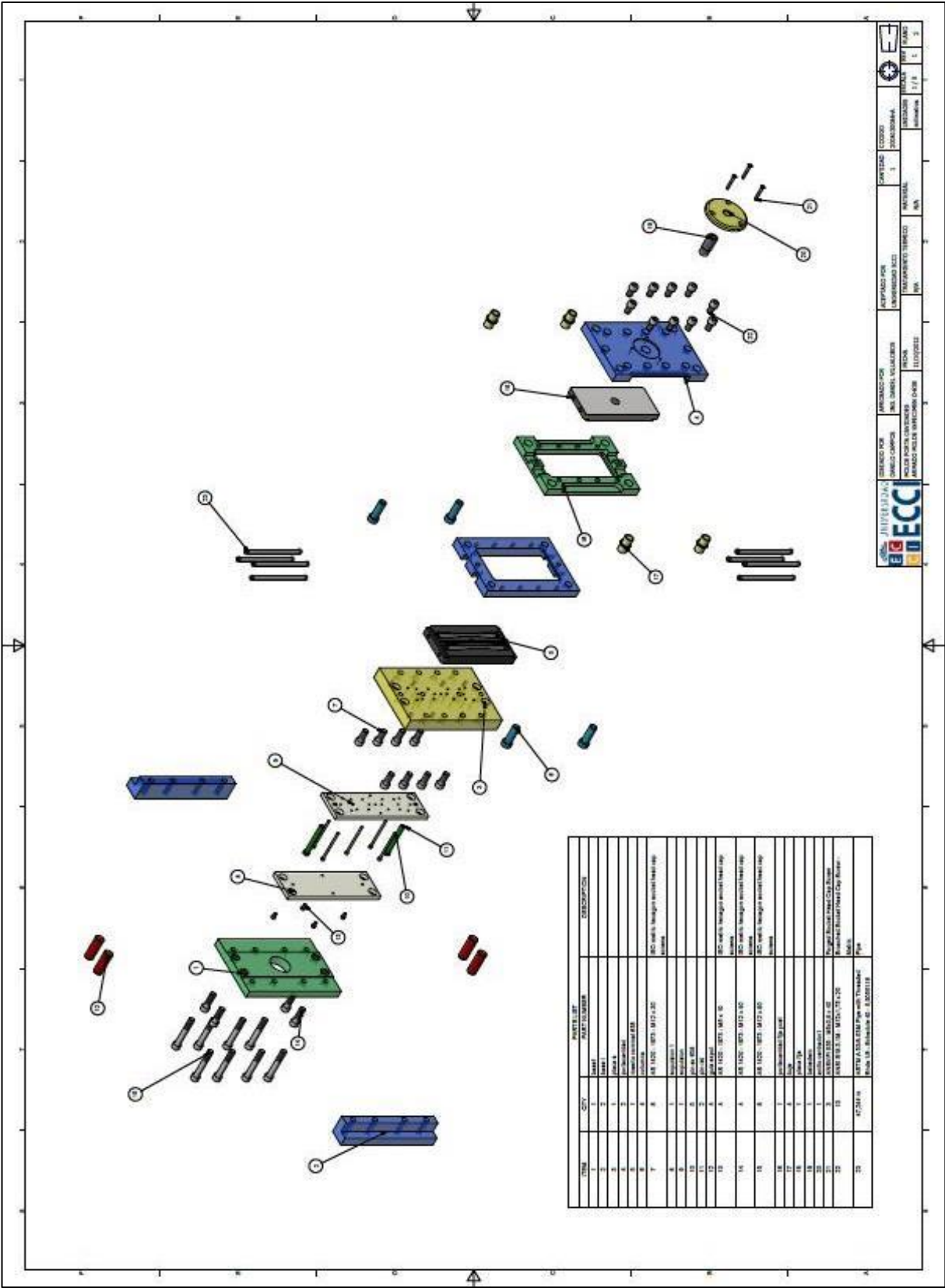
La cantidad de planos emitidos para la construcción son:

- Isométrico.
- Vista superior
- Vista frontal
- Vista lateral.
- Vista de Corte.
- Vista de Detalles.
- Tratamientos térmicos.
- Especificaciones de acabado superficial.

Los planos generales.

- Plano de conjunto.
- Plano pieza a pieza.
- Plano de explosión.

Ver planos de detalle en **Anexo B**.



## 5.15 FABRICACIÓN DEL MOLDE (DISEÑO FINAL. “FASE N°3”)

Para la fabricación del molde se establecen los planos de construcción y ensamble de cada componente del molde, los planos de construcción son el resultado de cálculos y análisis de procesos de inyección realizados previamente. Los planos de construcción son las especificaciones técnicas de construcción de los componentes, donde están establecidas las condiciones finales de cada elemento.

5.15.1 Obtención de los materiales. Los materiales seleccionados en el diseño final para la fabricación del molde son:

- Acero SAE P-20 para el contacto del polímero, placas de cavidades.
- Acero SAE 4140 para el contacto metal – metal, bujes y columnas.
- Acero SAE 1045 para las placas de contorno

Para la selección de los materiales de fabricación del molde se establecen los siguientes criterios de selección.

Materiales de contacto metal polímero. Este acero es seleccionado basados en los elementos de construcción de moldes o utillajes, donde las características del material son las adecuadas para el contacto entre metal polímero.

Algunas aplicaciones del acero SAE P-20, es utilizado para el moldeo por compresión, como porta moldes y piezas de apoyo, piezas para la construcción de maquinaria y útiles en su general, moldes para la inyección de plástico, herramientas para la fundición de presión de Zinc y moldeos en dos fases

Algunas aplicaciones para el acero SAE 4140, se emplea en cigüeñales, engranes, ejes, mesas rotatorias, válvulas y ruedas dentadas. También es utilizado en piezas forjadas, como herramienta, llaves de mano y destornilladores, espárragos, árboles de levas, flechas de mecanismos hidráulicos, etc.

Algunas aplicaciones para el acero SAE 1045, Por sus características de temple, se tiene una amplia gama de aplicaciones automotrices y de maquinaria en general, en la elaboración de piezas como ejes y semiejes, cigüeñales, etc. de resistencia media.



El maquinado inicial o pre maquinado, consiste en dimensionar las piezas de geometría rectangular en el largo, ancho y alto. Y las piezas de geometría circular en el diámetro y largo. Este es un proceso de desbaste con el cual se consigue que las piezas tengan una geometría regular para un mejor montaje en la máquina herramienta en la cual se realizara el mecanizado específico de la pieza según los planos de construcción.

En el maquinado convencional se realiza en dos máquinas diferentes, la fresadora convencional para las piezas de geometría rectangular y el torno paralelo para las piezas de geometría circular. Los procesos realizados en la fresadora convencional son: Planeado para quitar las irregularidades de las superficies de las placas. Taladrado para realizar los agujeros correspondientes a cada placa. Fresado para realizar los contornos de las cajas correspondientes a cada placa. En general los procesos de torno son: refrentado, cilindrado, escalonado, taladrado, chaflanado para las piezas de geometría circular que son Bujes, Columnas, Anillo centrador. El maquinado convencional de las piezas que componen el molde fue realizado por la baja complejidad del mecanizado de las mismas placas y piezas cilíndricas.

Maquinado de las placas de insertos. Para el mecanizado de las placas de los insertos se utiliza una maquina CNC (centro de mecanizado Leadwell V30). Donde se elaboran las geometrías de los especímenes en las placas de los insertos.

En el **Anexo D** se encontrarán las fichas técnicas de los materiales de construcción del molde

## 5.16 SIMULACIÓN MECANIZADO CNC SOFTWARE MASTER CAM X2

Para el proceso de simulación de mecanizado se requiere claridad en los factores que componen el proceso tales como: material a mecanizar, herramientas de corte, parámetros de mecanizado, operaciones de mecanizado.

Selección de herramientas de corte. Existe una gran variedad de herramientas de corte que se pueden utilizar para realizar mecanizados, en este proceso de selección se toman en cuenta las geometrías de mecanizado, el material a mecanizar y el material de herramienta. Este tipo de herramientas debe contar con ciertas características para poder ser utilizables y realmente eficaces en su desempeño.

Tabla 13. Tabla de selección de herramientas

Selección de Herramientas					
Item	Herramienta	Diámetro	Material	Operación	Criterio de Selección
1	Fresa de Planeado	60 mm	Plaquetas de metal duro	Planeado superficies de mecanizado	Planitud de la superficie de mecanizado
2	Broca de centros	numero 5	HSS	puntos de centros de los agujeros en las placas	Usos generales
3	Brocas helicoidales	4 mm	HSS	Taladrado de los agujeros de las placas	Usos generales
4	Escariador plano 4 filos	10 mm	Carburo de tungsteno	Mecanizado de desbaste	Eficiencia de mecanizado
5	Escariador plano 4 filos	3 mm	Carburo de tungsteno	Mecanizado de acabado de contornos	Eficiencia de mecanizado
6	Escariador redondo 4 filos	5 mm	Carburo de tungsteno	Mecanizado canales de distribución	Eficiencia de mecanizado

Fuente. Autor

**Fresa de Insertos:** El planeado tiene por objetivo conseguir superficies planas. Para el planeado se utilizan generalmente fresas de planear de plaquetas intercambiables de metal duro, existiendo una gama muy variada de diámetros de estas fresas y del número de plaquetas que monta cada fresa. Los fabricantes de plaquetas recomiendan como primera opción el uso de plaquetas redondas o con ángulos de 45° como alternativa.

**Broca de centros:** Broca de diseño especial empleada para realizar los puntos de centrado en una pieza para facilitar su mecanizado.

**Broca helicoidal:** Broca de uso general utilizada para realizar los agujeros de las placas.

**Escariador de punta plana:** Escariador con alta precisión de mecanizado, utilizado para realizar las cavidades de las placas, escalones, mazarota y venteo. (10mm diámetro). Utilizado para realizar el mecanizado de los contornos de las cavidades, punto de inyección. (3mm diámetro)

**Escariador de punta redonda:** El escariador de punta redonda se utiliza para mecanizar los canales de distribución primarios y secundarios de las placas de las cavidades del molde.

5.16.1 Parámetros para la simulación del mecanizado. Los parámetros para el mecanizado de las placas de las cavidades son: velocidad de corte del material obtenida por tablas, cálculo de velocidad de giro de la herramienta, cálculo de avance de la herramienta y la profundidad de corte por pasada.

Los parámetros son calculados en base a los valores de velocidad de corte dependiendo del material de la herramienta, y del tipo de operación, desbaste o acabado.

**Velocidad de corte:** La velocidad de corte es el factor principal que determina la duración de la herramienta. Una alta velocidad de corte permite realizar el mecanizado en menos tiempo, pero acelera el desgaste de la herramienta.

**Velocidad de rotación de la herramienta:** La velocidad de rotación del husillo portaherramientas se expresa habitualmente en revoluciones por minuto (rpm).

En las fresadoras de control numérico, esta velocidad es controlada con un sistema de realimentación en el que puede seleccionarse una velocidad cualquiera dentro de un rango de velocidades, hasta una velocidad máxima.

La velocidad de rotación de la herramienta es directamente proporcional a la velocidad de corte e inversamente proporcional al diámetro de la herramienta.

$$n[\text{min}^{-1}] = \frac{V_c \left[ \frac{\text{m}}{\text{min}} \right] \times 1000 \left[ \frac{\text{mm}}{\text{m}} \right]}{\pi \times D_c [\text{mm}]} \quad (40)$$

**Velocidad de avance:** El avance o velocidad de avance en el fresado es la velocidad relativa entre la pieza y la herramienta, la velocidad con la que progresa el corte. El avance y el radio de la punta de la herramienta de corte son los dos factores más importantes de los cuales depende la rugosidad de la superficie obtenida en el fresado. El avance por revolución ( $f_n$ ) es el producto del avance por diente por el número de dientes ( $z$ ) de la herramienta.

$$f_n \left[ \frac{\text{mm}}{\text{rev}} \right] = f_z \left[ \frac{\text{mm}}{\text{diente}} \right] \times z \left[ \frac{\text{diente}}{\text{rev}} \right] \quad (41)$$

La velocidad de avance es el producto del avance por revolución por la velocidad de rotación de la herramienta.

$$f \left[ \frac{\text{mm}}{\text{min}} \right] = f_n \left[ \frac{\text{mm}}{\text{rev}} \right] \times n \left[ \frac{\text{rev}}{\text{min}} \right] = f_z \left[ \frac{\text{mm}}{\text{diente}} \right] \times z \left[ \frac{\text{diente}}{\text{rev}} \right] \times n \left[ \frac{\text{rev}}{\text{min}} \right] \quad (42)$$

Profundidad de corte por pasada: La profundidad de corte o profundidad de pasada es la profundidad de la capa arrancada de la superficie de la pieza en una pasada de la herramienta. Habitualmente se expresa en milímetros (mm). La anchura de corte, expresado en mm, es la anchura de la parte de la pieza implicada en el corte. Estos parámetros hay que tenerlos en cuenta por la influencia que tiene en el cálculo de la sección de viruta y consecuentemente en la fuerza de corte necesaria para poder realizar el mecanizado.

La profundidad de pasada se establece a priori y depende principalmente de las creces de material a mecanizar, del grado de precisión dimensional a conseguir, de la potencia de la máquina y de la relación con respecto al avance seleccionado y de parámetros propios de la herramienta de corte como su tamaño, el radio de la punta y su perfil.

Tabla 14. Parámetros de velocidad de corte de herramientas

Recomendaciones de mecanizado			
Torneado			
Parámetros de corte	Torneado con metal duro		Torneado con acero rápido
	Torneado de desbaste	Torneado fino	Torneado fino
velocidad de corte (Vc) m/min.	130 - 180	180-210	25
Avance (f) mm/rev	0,3 - 0,6	-0,3	-0,3
Profundidad (ap) mm	2 a 6	-2	-2
Fresado frontal y axial			
Parámetros de corte	Fresado con metal duro		Fresado con acero rápido
	Fresado de desbaste	Fresado fino	Fresado fino
velocidad de corte (Vc) m/min.	70 - 120	120-170	30
Avance (f) mm/rev	0,2 - 0,4	0,1 - 0,3	0,1
Profundidad (ap) mm	2 a 5	-2	-2
Fresado de acabado			
Parámetros de corte	Fresado con metal duro		Fresado con acero rápido
	Fresado de desbaste	Fresado fino	Fresado fino
velocidad de corte (Vc) m/min.	55	110-160	25
Avance (f) mm/rev	0,03 - 0,20	0,08 - 0,20	0,05 - 0,35
Taladro con brocas de acero rápido			
diámetro de la broca en mm	velocidad de corte (Vc) m/min.	Avance (f) mm/rev	
0-5	20	0,08 - 0,20	
5 a 10	20	0,20 - 0,30	
10 a 15	20	0,30 - 0,35	
15 a 20	20	0,35 - 0,40	
Tipo de rectificado	Recomendación de muelas		
Rectificado frontal	A 46 HV		
Rectificado frontal			
por segmentos	A 24 GV		
Rectificado cilíndrico	A 46 LV		
Rectificado interno	A 46 JV		
Rectificado del perfil	A 100 LV		

Fuente. Autor

## 5.17 CÁLCULOS DE PARÁMETROS DE CORTE

Los cálculos de los parámetros de corte se realizan la graduación de las velocidades y de los avances de las herramientas seleccionadas para realizar los mecanizados en la maquina CNC.

Los parámetros plasmados en la Tabla 14 son valores establecidos para realizar las operaciones de acuerdo con el tipo de herramienta a utilizar, estos valores son reemplazados en las formulas 40, 41 y 42 para obtener los resultados que se muestran desde la Tabla 15 hasta la Tabla 18.

5.18.1 Parámetros de corte (taladrado). Estos parámetros son los que se usan para realizar los agujeros de todo el conjunto, ya que se procesara el acero P-20 solo se realiza el calcula para este material. Se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15. Cálculo velocidad de corte broca

<b>Taladrado broca helicoidal</b>		
calculo de velocidad de corte para la broca helicoidal de 4mm de diámetro		
Acero Rapido		
$V_c =$	$\frac{\pi \times d \times N}{1000}$	
despejando n=	donde	
$V_c$	velocidad de corte	20
$d$	diámetro	4
$n$	revoluciones	
1000	factor de conversión	1000
$\pi$	pi	3,1416
$n =$	$\frac{V_c \times 1000}{\pi \times d}$	
<b>n=</b>	<b>1592</b>	Rpm
<b>avance</b>	<b>127</b>	mm/min

Fuente. Autor

5.18.2 Parámetros de corte (fresado). Los valores resultantes de los parámetros de fresado son la calibración de la máquina para realizar los desbastes de las piezas, para este caso específico, las placas de cavidades de insertos de los especímenes. Los parámetros establecidos en la Tabla 16 son los que se usaran para el desbaste total de la pieza y dejar las medidas finales aproximadas.

Los parámetros establecidos en la Tabla 17 son los que se usaran para realizar el acabado de la pieza, para que la pieza quede con baja rugosidad superficial y el acabado de precisión.

Tabla 16. Cálculo velocidad de corte fresado CNC Desbaste

Desbaste Herramienta de punta plana						
calculo de velocidad de corte para el escariador de punta plana de 10mm de diámetro				calculo de velocidad de corte para el escariador de punta plana de 3mm de diámetro		
Metal Duro				Metal Duro		
Vc =	$\pi \times d \times N$			Vc =	$\pi \times d \times N$	
	1000				1000	
despejando n=	donde			despejando n=	donde	
Vc	velocidad de corte	55		Vc	velocidad de corte	55
d	diámetro	10		d	diámetro	3
n	revoluciones			n	revoluciones	
1000	factor de conversión	1000		1000	factor de conversión	1000
$\pi$	pi	3,1416		$\pi$	pi	3,1416
n=	Vc X 1000			n=	Vc X 1000	
	$\pi \times d$		$\pi \times d$			
n=	1751	Rpm	n=	5836	Rpm	
avance	210	mm/min	avance	700	mm/min	
Profundidad	0,75	mm	Profundidad	0,75	mm	

Fuente. Autor

Tabla 17. Cálculo velocidad de corte Fresado Acabado

Acabado Herramienta de punta plana						
calculo de velocidad de corte para el escariador de punta plana de 10mm de diámetro				calculo de velocidad de corte para el escariador de punta plana de 3mm de diámetro		
Metal Duro				Metal Duro		
Vc =	$\pi \times d \times N$			Vc =	$\pi \times d \times N$	
	1000				1000	
despejando n=	donde			despejando n=	donde	
Vc	velocidad de corte	120		Vc	velocidad de corte	120
d	diámetro	10		d	diámetro	3
n	revoluciones			n	revoluciones	
1000	factor de conversión	1000		1000	factor de conversión	1000
$\pi$	pi	3,1416		$\pi$	pi	3,1416
n=	Vc X 1000			n=	Vc X 1000	
	$\pi \times d$				$\pi \times d$	
n=	3820	Rpm		n=	12732	Rpm
avance	1222	mm/min	avance	1019	mm/min	
Profundidad	0,5	mm	Profundidad	0,5	mm	

Fuente. Autor

5.18.3 Parámetros de corte escariador punta redonda. Estos valores son para usar la herramienta con la cual se mecanizarán los canales de distribución de las placas de cavidades de los especímenes.

Tabla 18. Cálculo de mecanizado de desbaste y acabado herramienta punta redonda

Desbaste y Acabado Herramienta de punta redonda				
calculo de velocidad de corte para el escariador de punta redonda de 5mm de diámetro				
Metal Duro				
$V_c =$	$\pi \times d \times N$		$V_c =$	$\pi \times d \times N$
	1000			1000
despejando $n=$	donde		despejando $n=$	donde
$V_c$	velocidad de corte	55	$V_c$	velocidad de corte
$d$	diámetro	5	$d$	diámetro
$n$	revoluciones		$n$	revoluciones
1000	factor de conversión	1000	1000	factor de conversión
$\pi$	pi	3,1416	$\pi$	pi
$n=$	$V_c \times 1000$		$n=$	$V_c \times 1000$
	$\pi \times d$			$\pi \times d$
<b>n=</b>	<b>3501</b>	Rpm	<b>n=</b>	<b>7003</b>
<b>avance</b>	<b>420</b>	mm/min	<b>avance</b>	<b>2241</b>
<b>Profundidad</b>	<b>0,75</b>	mm	<b>Profundidad</b>	<b>0,5</b>

Fuente. Autor

Los valores resultantes en las tablas 11 hasta la tabla 14, son valores con los cuales se realiza la programación de las herramientas para el mecanizado de las placas de cavidades del molde. Donde los mecanizados son básicos tales como taladrado, y fresado. Donde las variaciones se realizan dependiendo del diámetro de la herramienta a usar.

## 5.18 SIMULACIÓN DE OPERACIONES DE MECANIZADO.

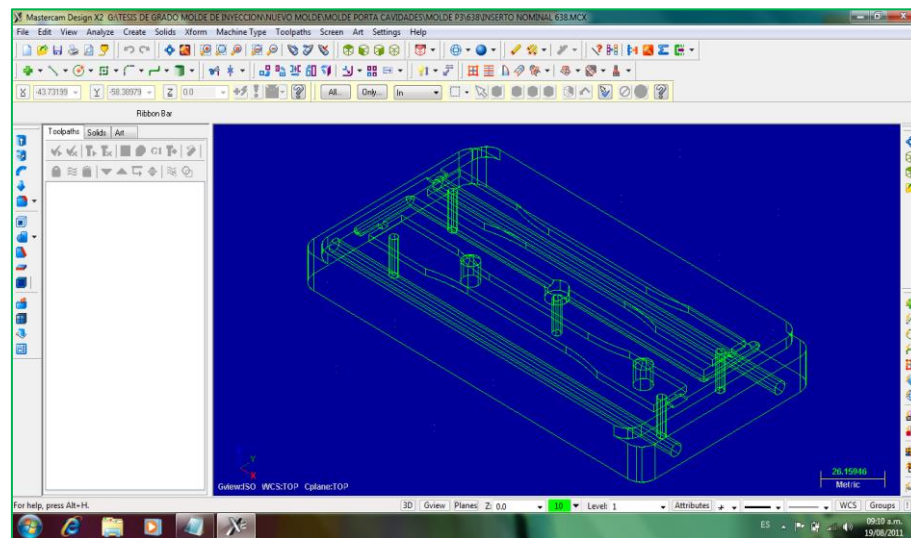
En esta sección del proyecto se realizan las simulaciones para cada uno de los componentes del molde, el resultado de estas simulaciones es el código general de fabricación y ejecución de la máquina, por ser varios los procesos y de extensas características solo se ilustrará el mecanizado en primera instancia el proceso general de uso de la herramienta CAD / CAM y en segunda instancia la simulación del insertos del espécimen de la norma ASTM D-638 Tipo1.

En la primera instancia se ilustraran con imágenes y una breve explicación del proceso que se debe realizar para uso de la herramienta CAD / CAM.

En el entorno del software se encuentran los parámetros iniciales de ajuste del mecanizado, selección del tipo de máquina, unidades de trabajos (sistema internacional o sistema inglés), tipo de material y seguridad.

- Para iniciar la programación en el software Master Cam X2 se debe importar el elemento CAD, el modelo importado tiene la restricción del centro geométrico “el punto cero (0) de la pieza”, esto es debido a la ubicación de la pieza en el contorno, donde se establecen las coordenadas de 0X, 0Y y 0Z para la ejecución del programa desde el inicio de las operaciones de mecanizado en el centro de mecanizado. Como se muestra en la Figura 88.

Figura 88. Entorno Master CamX2 importación de modelo

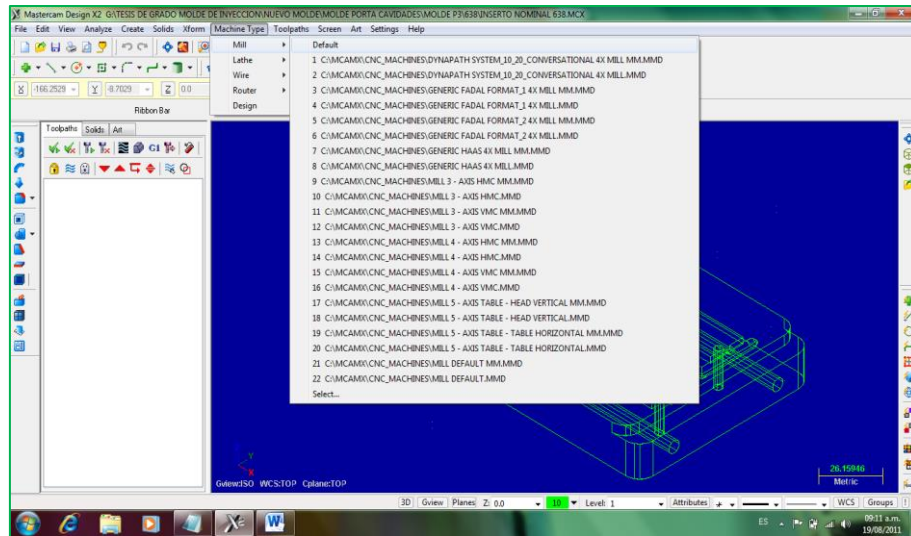


Fuente. Autor

- Una vez importada la pieza y ajustadas las coordenadas de la pieza dentro del programa, se realiza la selección del tipo de centro de mecanizado en cual se realizarán los diferentes tipos de mecanizado, en esta selección hay una posibilidad de uso general que es por defecto, es compatible con la mayoría de marcas y tipos de centros de mecanizado, y en este proyecto se usó esta posibilidad de uso por defecto y se cumplió con la función necesaria. Como se muestra en la Figura 89.



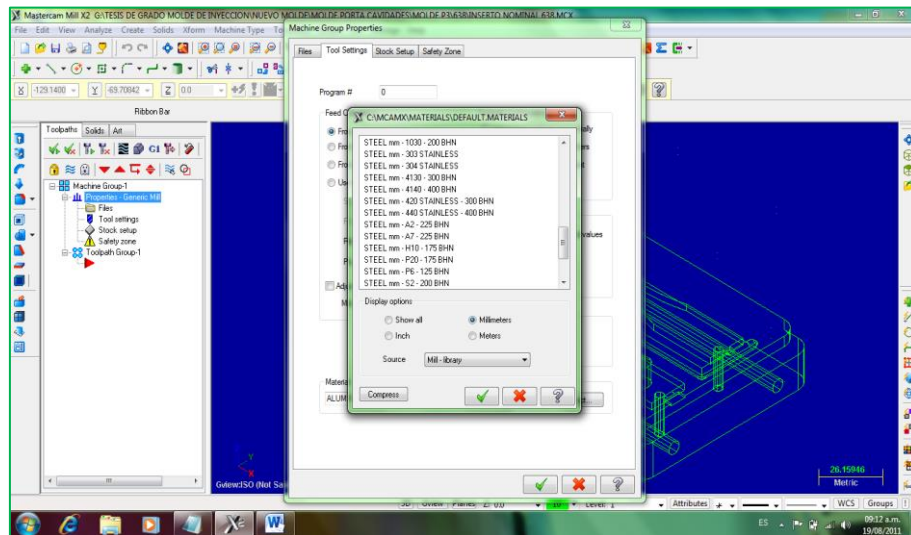
Figura 89. Entorno Master Cam X2 selección de maquina



Fuente. Autor

- El siguiente paso es seleccionar el tipo de material de la biblioteca de materiales del programa al cual se le realizara el proceso de mecanizado. Para este proceso la selección es del acero SAE P-20. Como se muestra en la Figura 90.

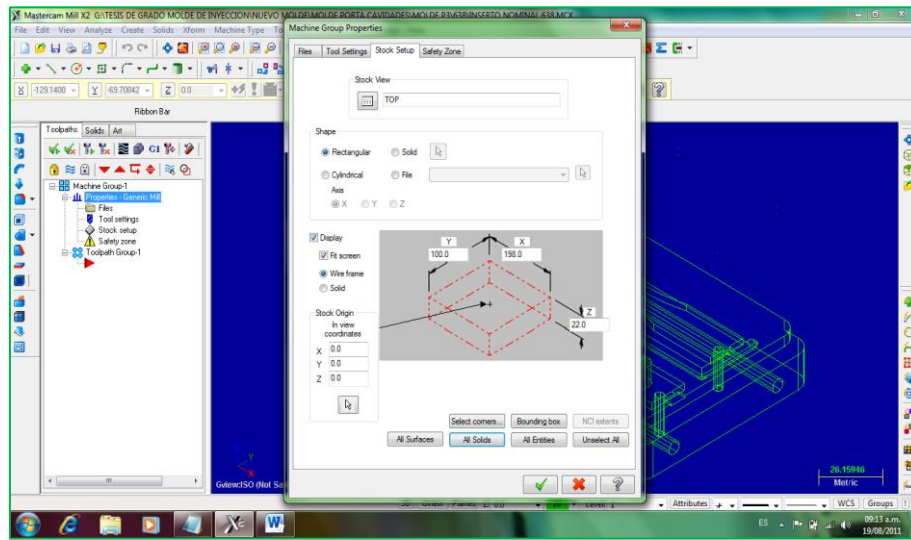
Figura 90. Entorno Master Cam X2 selección de material



Fuente. Autor

- El siguiente punto es la ubicación cero (0) de máquina con respecto a cero (0) de la pieza. La ubicación del punto cero (0) de la maquina coincide con el cero (0) geometrico de la pieza, donde inician los vectores X,Y y Z, como se muestra en la Figura 91.

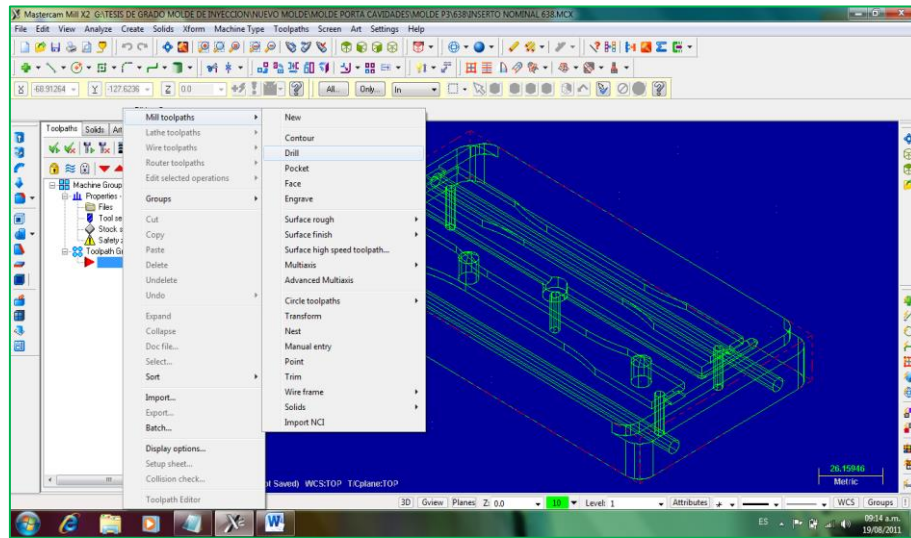
Figura 91. Entorno Master Cam X2 ubicación centro pieza



Fuente. Autor

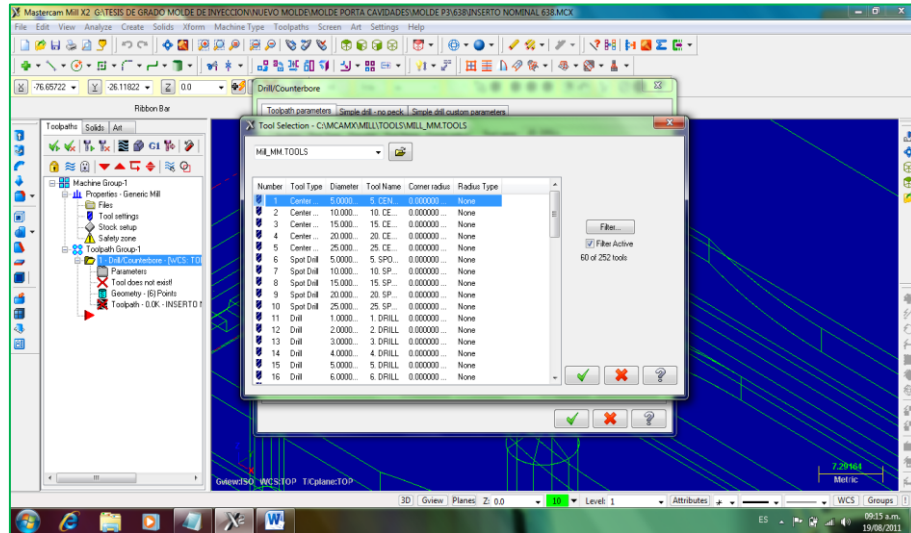
- Una vez los pasos anteriormente mencionados se encuentren realizados, se inicia con los diferentes tipos de mecanizados que se pueden ejecutar con esta herramienta. Mecanizados de contorno, mecanizados de taladrados, mecanizados de cajas entre muchos otros. En este proyecto se requieren de operación básicas de mecanizado, debido a que la geometría a mecanizar es plana en los ejes (X, Y y Z) en su totalidad, no tiene inclinaciones, o mecanizados especiales. Como se muestra en la Figura 92.
- Después de la selección de la operación de mecanizado que se realizara, es necesario indicar la herramienta con la cual se realizaran los mecanizados, este proceso requiere de los siguientes criterios, definiendo que tipo de herramienta se usara en el mecanizado, el diámetro de la herramienta, el numero en que se encontrara la herramienta en el magazine del centro de mecanizado, la velocidad de giro de la herramienta, la velocidad de avance de la herramienta y profundidad por pasada de la herramienta.

Figura 92. Entorno Master Cam X2 selección de operación de mecanizado



Fuente. Autor

Figura 93. Entorno Master Cam X2 selección herramienta de mecanizado.

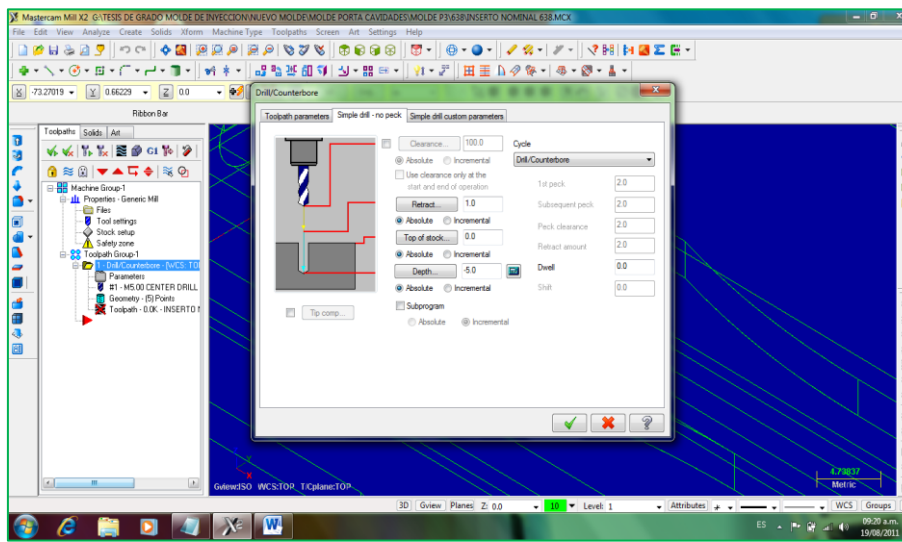


Fuente. Autor

- Las condiciones de operación de la herramienta son de gran importancia, es decir, en esta parte de la simulación se determina el comportamiento de la herramienta durante el mecanizado, donde se establecen las distancias en las

cuales la herramienta se acerca a la pieza y empieza a trabajar, con que velocidades se desplaza para hacer el proceso de mecanizado de la pieza más rápido en cuanto al acercamiento de la herramienta al punto cero “0” de pieza para ejecutar el mecanizado. Como se muestra en la Figura 94

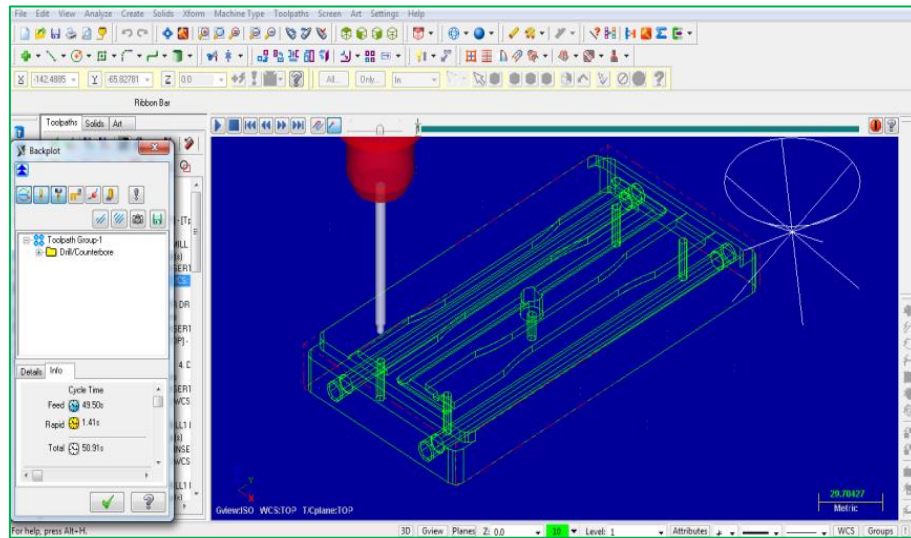
Figura 94. Entorno Master Cam X2 condiciones de trabajo de la herramienta



Fuente. Autor

- La verificación de las condiciones de la operación del mecanizado total, donde corre la simulación de la herramienta ejecutando el mecanizado de la pieza, donde se pueden reevaluar condiciones de mecanizado y realizar los ajustes que se consideren necesarios, aunque cada pieza de este proyecto tiene un trabajo independiente.
- En la simulación se observa el recorrido de la herramienta por las entidades seleccionadas, la trayectoria que lleva la herramienta, las tolerancias dimensionales de mecanizado, la simulación proyecto de forma virtual en qué forma se realizar el mecanizado dentro del centro de mecanizado, Como se muestra en la Figura 95.
- El último paso es generar el código de comunicación, una vez verificado el proceso de mecanizado, ratificando que no se requieren modificaciones o alteraciones al proceso, se realiza la generación del código, el código es la comunicación con el centro de mecanizado para realizar las operaciones seleccionas. En la Figura 96 se observa un breve código de mecanizado.

Figura 95. Entorno Master Cam X2 simulación de operación de mecanizado



Fuente. Autor

Figura 96. Entorno Master Cam X2 generación de programa de mecanizado

```
%
O0000
(PROGRAM NAME - INSERTO 638 NOMINALT )
( DATE=DD-MM-YY - 23-05-12 TIME=HH:MM - 10:19 )
N100 G21
N102 G0 G17 G40 G49 G80 G90
( 5. CENTER DRILL TOOL - 5 DIA. OFF. - 6 LEN. - 5 DIA. - 5. )
N142 T5 M6
N144 G0 G90 G54 X-19.5 Y-80. A0. S630 M3
N146 G43 H5 Z10.
N148 G99 G81 Z-3.2 R10. F80.
N150 X19.5 Y-75.
N152 X0. Y0.
N154 X-19.5 Y75.
N156 X19.5 Y80.
N158 G80
N160 M5
N162 G91 G28 Z0.
N164 G28 X0. Y0. A0.
N166 M01
```

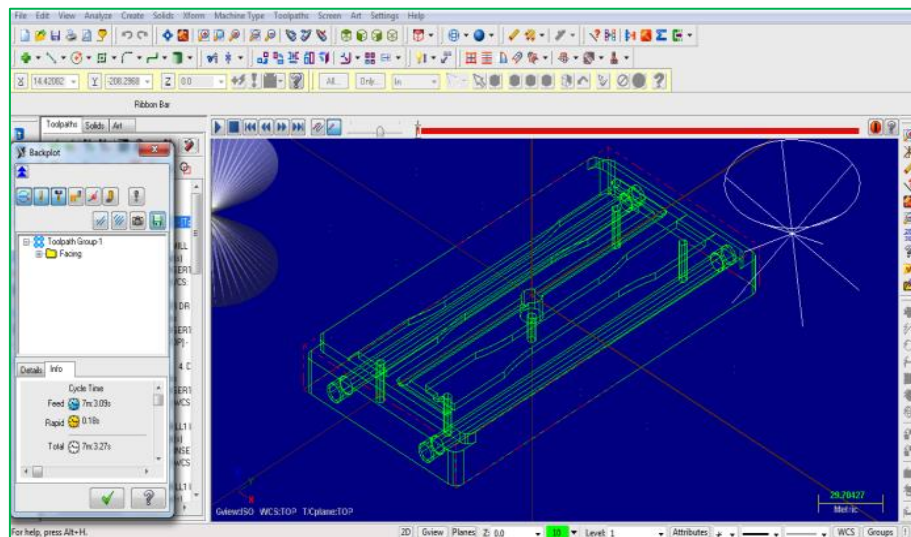
Fuente. Autor

En la segunda instancia, se mostrarán con una imagen y una breve explicación la simulación de las operaciones de mecanizado de la placa de insertos de la norma ASTM D-638 Tipo 1.



- La primera operación es un **FACING**, en otros términos, planeado de la pieza para lograr el paralelismo de la placa, eliminado cualquier imperfección de la superficie, para esta operación se seleccionó la fresa con plaquitas de insertos de diámetro 60mm, donde se ajustaron las condiciones de operación de la herramienta de acuerdo con las propiedades del acero. La Figura 97 muestra la simulación del proceso de planeado, donde los conos que se observan en la parte intermedia de la pantalla a los lados del modelo, representan la herramienta y la trayectoria recorrida por la herramienta.

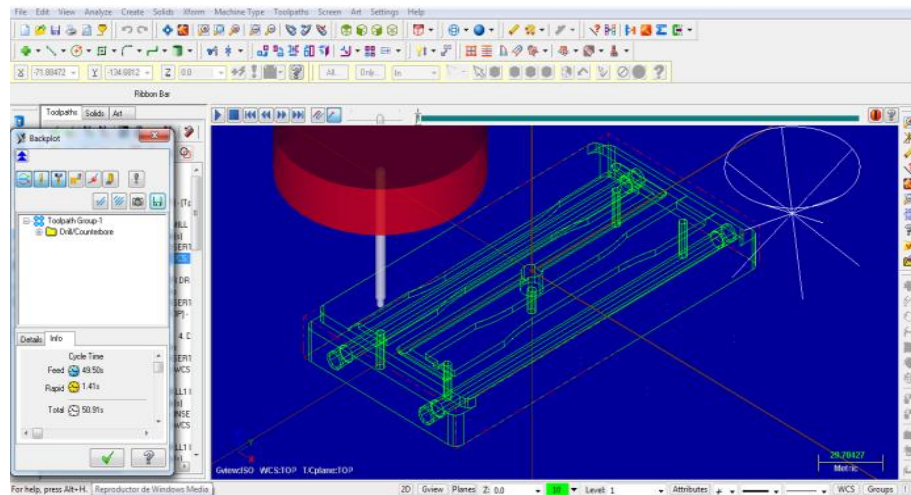
Figura 97. Entorno Master Cam X2 simulación de planeado



Fuente. Autor.

- La segunda operación realizada son los talados, en esta operación se requieren de dos herramientas y dos procesos diferentes, el primero de ellos es (drill), donde se ubica la broca de centros para dar inicio a los agujeros. Estos son los agujeros de los expulsores de la placa de expulsión. El segundo proceso es el taladrado intermitente. (Peck Drill), donde se instala una broca helicoidal, este taladrado permite que en el momento de retraer la herramienta se rompa la viruta, para que no se adhiera a la herramienta y provoque daños. Como se muestra en la Figura 98. Donde se observa la herramienta sobre los agujeros.

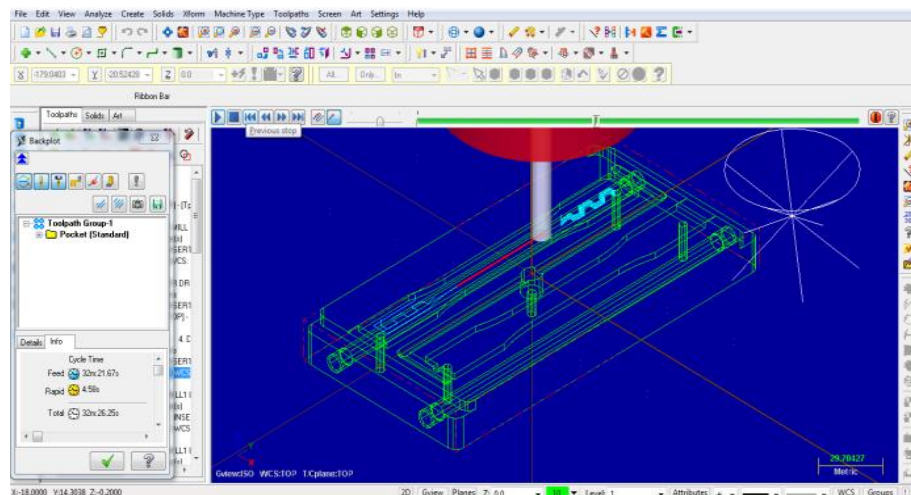
Figura 98. Entorno Master Cam X2 Taladrados



Fuente. Autor

- La tercera operación es el Fresado o caja. (Pocket), consiste en el grabado del espécimen de norma ASTM D-638 Tipo 1 en la placa, para esta operación se selecciona un escariador de cara plana de 10mm de diámetro para realizar la operación de desbaste, y para la operación de acabado se selecciona un escariador de punta plana de diámetro 3mm. Como se muestra en la Figura 99, donde se observa la trayectoria que recorre la herramienta para realizar el grabado del espécimen.

Figura 99. Entorno Master Cam X2 fresado



Fuente. Autor

- La cuarta operación son los contornos de generales, incluidos el contorno de los canales de distribución donde se selecciona un escariador de diámetro 5mm de punta redonda para generar la cavidad, el contorno de los puntos de inyección donde se selecciona un escariador de diámetro 3mm, los contornos de los escalones de acoplamiento de la placa.
- Con estas cuatro (4) operaciones realizadas, se procede a la generación del código para realizar las operaciones de mecanizado. Terminando las operaciones de simulación se realiza la visualización de la simulación, en el entorno se encuentran las herramientas que permiten la optimización del tiempo de mecanizado, donde se ajustan los tiempos muertos en el ciclo de mecanizado, es decir el tiempo que la herramienta demora en accionar y hacer contacto con el material. La generación del código es establecida en base a la simulación final.

## 5.19 HOJA DE PROCESO

La hoja de proceso, es una ruta de secuencias de operaciones lógicas para realizar un mecanizado, aplicando a este proyecto se muestra la secuencia lógica de la fabricación de placa de especímenes de la norma ASTM D-638 Tipo 1.



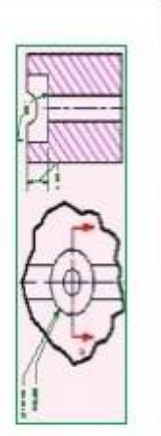
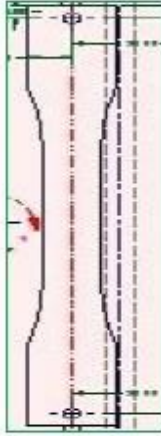
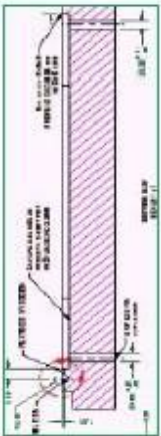
Esta secuencia muestra las operaciones de mecanizado y trabajo en taller que se realizaron para el mecanizado de la placa.



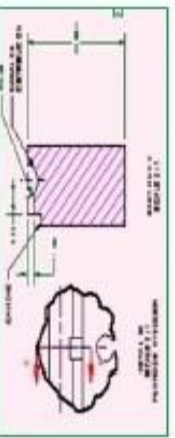
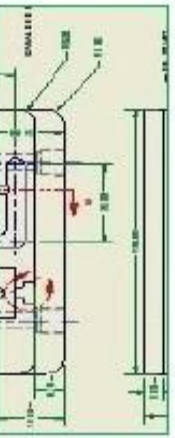
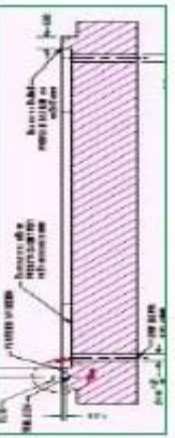
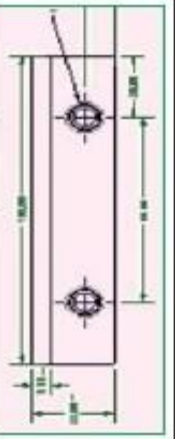
La secuencia parte desde el mecanizado de planeado de la placa hasta el acabado superficial de las cavidades.

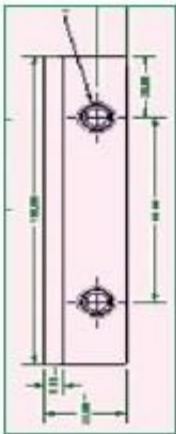

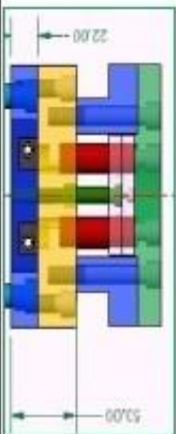
La base de esta hoja de proceso son las especificaciones plasmadas en los planos de construcción, donde el producto terminado debe cumplir con las especificaciones dadas en el plano, especificaciones dimensionales, tolerancias máximas y mínimas, dureza de la pieza y acabado superficial.

En esta hoja de proceso se contemplan diferentes aspectos, tales como herramientas que se deben utilizar por cada uno de los parámetros, elementos manuales de ajuste, maquinas adicionales para los componentes, y se muestra una imagen de detalles con las especificaciones de cada ítem.



HOJA DE PROCESO PLACA CAVIDADES ESPECIMEN ASTM D-638 TIPO 1						
ITEM	IMAGEN	PROCESO	OPERACION	DESCRIPCION	MAQUINA	HERRAMIENTA
1		Mecanizado contorno superficial de la pieza	Contorno	Ajuste de medida ancho, largo, alto de la placa en material P-20	Fresadora convencional	Fresa
2		Mecanizado agujeros de centro	Taladro de Centros	mecanizado guia de cinco (5) agujeros de centros	Maquina CNC	broca de centros
3		Mecanizado Agujeros	Taladro Rompe virutas	mecanizado de cinco (5) agujeros para desplazamiento de guias espulsoras	Maquina CNC	Broca helicoidal de diametro 5mm
4		Mecanizado Mazarrota	Caja	Mecanizado mazarrota,	Maquina CNC	Escariador plano 4 filos de diametro 10mm
5		Mecanizado desbaste Insertos de placas	Contorno	mecanizado de los insertos segun definicion de modelo y programa, profundidad de 4mm	Maquina CNC	Escariador plano 4 filos de diametro 10mm
6		Mecanizado acabado Insertos de placas	Contorno	mecanizado de los insertos segun definicion de modelo y programa, profundidad de 4mm	Maquina CNC	Escariador plano 4 filos de diametro 10mm

7		Mecanizado acabado contornos Insertos de placas	Contorno	Acabado de contorno con inclinacion de desmoldeo de 1 grado	Maquina CNC	Escariador plano 4 filos de diametro 3mm
8		Mecanizado Canales de distribucion primarios y secundarios	Caja	conexion mecanica entre la mazarrota y el punto de inyeccion de entrada a las cavidades del molde.	Maquina CNC	Escariador redondo 4 filos de diametro 3mm
9		Mecanizado Punto de Inyeccion	Caja	Mecanizado de Conexion entre canal de distribucion secundario y cavidad del molde.	Maquina CNC	Escariador plano 4 filos de diametro 3mm
10		Mecanizado Tope	Planeado	Mecanizado de Tope de ensamble de placa de insertos, profundidad 5mm, ancho 8mm, por el ancho de la placa	Maquina CNC	Escariador plano 4 filos de diametro 10mm
11		Mecanizado Radios cordes	Planeado	Mecanizado de los bordes de la placa, para el ensamble dentro de las placas de contorno del molde.	Maquina CNC	Escariador plano 4 filos de diametro 10mm
		Mecanizado ductos de refrigeracion	Taladro de centros	Montaje en fresadora convencional, marcacion y trabajo sobre eje horizontal y transversal.	Fresadora convencional	broca de centros

		Mecanizado ductos de refrigeracion	Taladro Rompe virutas	perforacion de placa, bon broca extra larga. Horizontal.	Fresadora convencional	Broca extra larga 1/4
		Mecanizado ductos de refrigeracion	Roscado 1/8 NPT	roscado convencional con macho de 1/8 npt.	Banco de Trabajo	Macho Rosca 1/8 npt
12		Tratamiento termico de placas	Temple y Revenido	Homogenizacion de la composicion de las placas. Aumento de dureza segun ficha tecnica.	Horno Mufla	
13		Rectificado superficial de la placa	Arranque viruta con abrasivos		Rectificadora Plana	Puefra esmeril
14		Rectificado Caviades de insertos	Contorno	Rectificado Superficial del insertos, ajustado medidas con tolerancias segun el especimen	Maquina CNC	escariador planos de 4 filos de diametro 10mm
15		Rectificado Caviades de insertos	Contorno	Rectificado Superficial del insertos, ajustado medidas con tolerancias segun el especimen	Maquina CNC	escariador planos de 3 filos de diametro 10mm

16		brillo de placa	Lapeado	Lijado de superficie de contacto de polímero	Banco de Trabajo	Lija Nº 100
17		brillo de placa	Lapeado	Lijado de superficie de contacto de polímero	Banco de Trabajo	Lija Nº 400
18		brillo de placa	Lapeado	Lijado de superficie de contacto de polímero	Banco de Trabajo	Lija Nº 600
19		brillo de placa	Lapeado	Lijado de superficie de contacto de polímero	Banco de Trabajo	Lija Nº 1000
20		brillo de placa	Lapeado	brillo con trapo y crema billa meta	Banco de Trabajo	Brilla Metal

## 5.20 TRATAMIENTO TÉRMICO, TEMPLE Y REVENIDO

Para el proceso de tratamiento térmico de las placas de contacto con el polímero se realiza la medición de la dureza de las placas, se analizan los valores obtenidos de las mediciones realiza el tratamiento térmico. Los valores mostrados en la tabla 15, son los valores medidos en cada placa antes del proceso de tratamiento térmico, esto se realiza con el fin de establecer la dureza de la placa la cual se debe alcanzar con el tratamiento térmico respectivo. Para las placas de acero P\_20 de contacto Metal Polímero se realizará temple y revenido, con el fin de homogenizar la dureza de las placas y aumentar su vida útil.

Tabla 19. Valores medidos de placas de insertos sin tratamiento térmico

Tratamiento termico temple y revenido					
	HRc PF	HRc 5420	HRc 790	HRc 256	HRc 638
valor 1	30,6	25,5	29,6	24,2	30,6
valor 2	33,3	29,6	30,4	31,2	30,9
valor 3	33,2	29,0	30,8	32,3	31,0
valor 4	31,9	27,5	28,7	28,2	29,3
valor 5	33,1	30,5	25,8	28,7	33,1
promedio	32,4	28,4	29,1	28,9	31,0

Fuente. Autor

Para realizar el proceso de temple y revenido de las placas de las cavidades del molde, se requiere de hornos tipo mufla. Y se realiza el siguiente proceso:

Paso 1: Graduación de temperatura de 675 a 735 °C para precalentar, para el temple de austenización se aumenta la temperatura entre 815 a 845 °C y se mantiene durante 30 a 45 minutos. El enfriamiento se realiza en aceite a temperatura de 65 a 95 °C.

Pasó 2: En el revenido para alcanzar una dureza de 40 HRc en base a la tabla de especificaciones de materiales (SISA P-20) se gradúa la temperatura a 525 °C y se mantiene por 2 horas para el alivio de tensión y posteriormente enfriamiento al aire hasta alcanzar la temperatura ambiente. Como resultado del tratamiento térmico se obtiene una dureza homogénea de 40 HRc en todas las placas.



### 5.21 ACABADO SUPERFICIAL DE LAS CAVIDADES DEL MOLDE

El pulido del molde se comienza con el lapeado, que consiste en usar una serie de lijas para el pulido interno de la cavidad hasta alcanzar el brillo espejo de las cavidades del molde y los canales de distribución, todo el metal que tenga contacto con el polímero. Se comienza con una lija gruesa 100 y se termina con una lija 800, cuando las cavidades están pulidas se brilla con un paño suave y brilla metal para alcanzar el acabado brillo espejo.

### 5.22 PUESTA A PUNTO DEL MOLDE

En esta parte del proceso, se realiza y el ensamble y los ajustes de funcionamiento del molde, siguiendo los parámetros establecidos en los planos de ensamble del molde que se encuentran en el anexo dos (2). También se realizan las pruebas de funcionamiento en vacío, el molde se instala en la maquina con las debidas condiciones de seguridad y se verifica que el molde habrá y cierre sin dificultad,

### 5.23 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y RESULTADOS

En las pruebas de funcionamiento de molde, se establecen los parámetros y se realizan ajuste a la maquina según los resultados de la Tabla 12 para el espécimen ASTM D-638 Tipo 1.

Para la verificación de las probetas del espécimen, se realizan ensayos con material Polipropileno (PP) y Polietileno de baja densidad (LDPE). Estas pruebas se realizan con el fin de verificar los parámetros de inyección obtenidos en el cálculo y la simulación realizada en el software Moldflow Adviser.

5.23.1 Resultado final de inyección espécimen ASTM D-638 tipo 1 material polímero polipropileno.

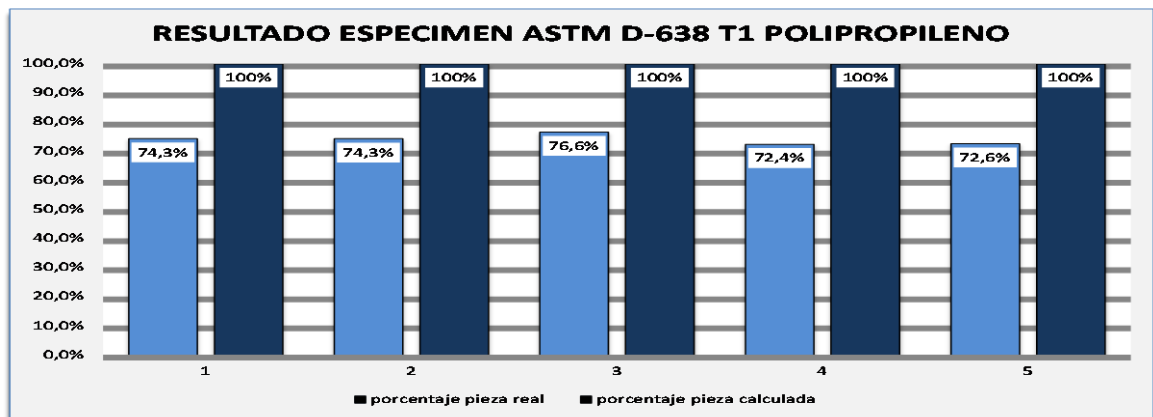
Volumen: 8.394 cm<sup>3</sup>  
 Densidad: 0.94 g/cm<sup>3</sup>  
 Peso: 7.83 g

Tabla 20. Resultados espécimen ASTM D-638 T1. Polipropileno

Resultado espécimen ASTM D-638 tipo 1 Polipropileno					
muestra	peso pieza real gr	porcentaje pieza real	presicion especimen	peso pieza calculado gr	porcentaje pieza calculada
1	5,8212	74,3%	25,7%	7,83	100%
2	5,8181	74,3%	25,7%	7,83	100%
3	5,9984	76,6%	23,4%	7,83	100%
4	5,6693	72,4%	27,6%	7,83	100%
5	5,6860	72,6%	27,4%	7,83	100%
promedio	5,7986	74,1%	25,9%	7,83	100%

Fuente. Autor

Figura 100. Resultados espécimen ASTM D-638 T1. Polipropileno



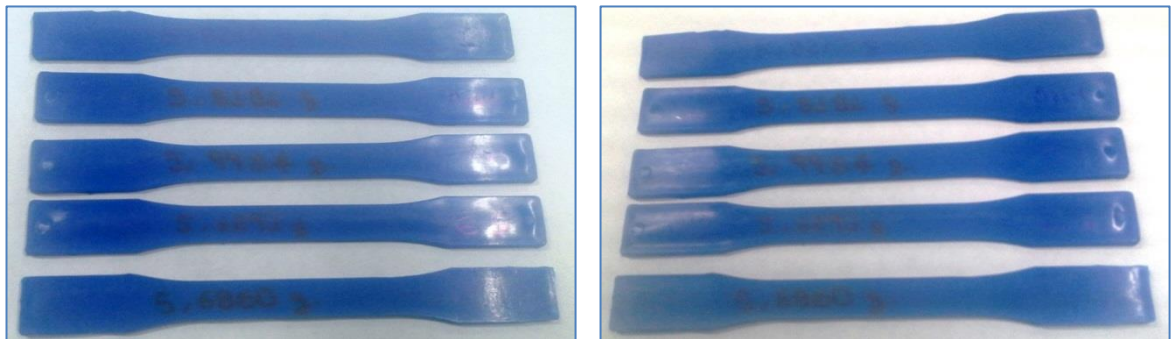
Fuente. Autor

El espécimen inyectado es evaluado bajo las condiciones de inyección y los resultados obtenidos en la simulación con el software Moldflow Adviser. Iniciando por las dimensiones de largo, ancho y espesor, acabado superficial, complejidad del modelo, tiempos de inyección y solidificación del espécimen, funcionamiento

general del molde, deslizamiento de placas, deslizamiento y retorno de la plaza expulsora. Estos parámetros se cumplieron en el proceso de inyección.

En las pruebas de inyección se observó un defecto con respecto al peso de la pieza del 25.9% menos de peso. Las recomendaciones para la inyección del espécimen en forma cíclica son de ajuste de parámetros de máquina sobre los valores arrojados por el software y un sistema de enfriamiento al molde ya que no se contó con este elemento durante el proceso de pruebas.

Figura 101. Especímenes ASTM D-638 tipo 1 polipropileno



Fuente. Autor



5.23.2 Resultado final de inyección espécimen ASTM D-638 tipo 1, material polímero polietileno de baja densidad.

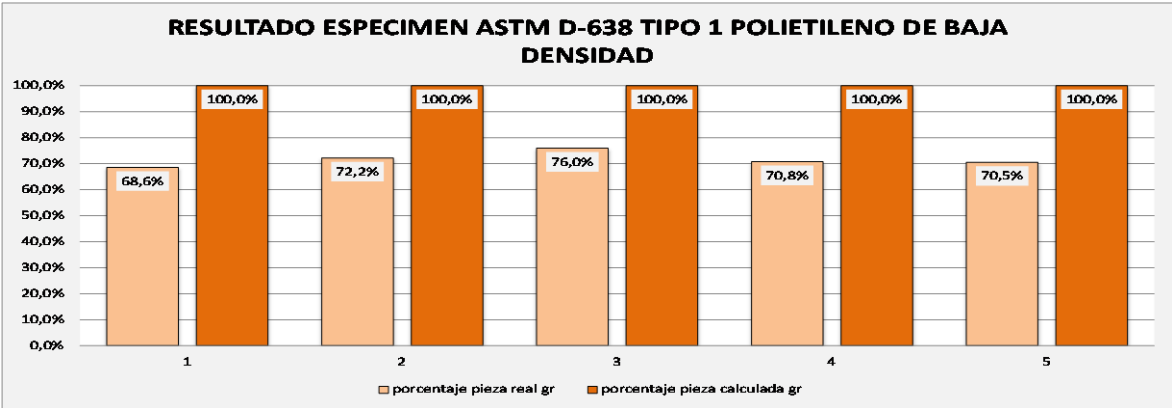
Volumen: 8.394 cm<sup>3</sup>  
Densidad: 0.925 g/cm<sup>3</sup>  
Peso: 7.76 g

Tabla 21. Resultados espécimen ASTM D-638 T1. Polietileno de baja densidad

Resultado espécimen ASTM D-638 tipo 1 Polietileno de baja densidad					
muestra	peso pieza real gr	porcentaje pieza real gr	presicion especimen	peso pieza calculado gr	porcentaje pieza calculada gr
1	5,3245	68,6%	31,4%	7,76	100,0%
2	5,6043	72,2%	27,8%	7,76	100,0%
3	5,8951	76,0%	24,0%	7,76	100,0%
4	5,4945	70,8%	29,2%	7,76	100,0%
5	5,4741	70,5%	29,5%	7,76	100,0%
promedio	5,5585	71,6%	28,4%	7,76	100,0%

Fuente. Autor

Figura 102. Resultados espécimen ASTM D-638 T1. Polietileno de baja densidad



Fuente. Autor

El espécimen inyectado es evaluado bajo las condiciones de inyección y los resultados obtenidos en la simulación con el software Moldflow Adviser. Iniciando por las dimensiones de largo, ancho y espesor, acabado superficial, complejidad del modelo, tiempos de inyección y solidificación del espécimen, funcionamiento

general del molde, deslizamiento de placas, deslizamiento y retorno de la plaza expulsora. Estos parámetros se cumplieron en el proceso de inyección.

En las pruebas de inyección se observó un defecto con respecto al peso de la pieza del 28.4% menos de peso. Las recomendaciones para la inyección del espécimen en forma cíclica son de ajuste de parámetros de máquina sobre los valores arrojados por el software y un sistema de enfriamiento al molde ya que no se contó con este elemento durante el proceso de pruebas.

Figura 103. Especímenes ASTM D-638 tipo 1 polietileno de baja densidad



Fuente. Autor

## CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES

Después de diseñar y fabricar un molde multipropósitos, objetivo de este proyecto se mencionan las conclusiones de acuerdo con las fases de materialización del mismo.

Fase 1: diseño preliminar del molde.

1. Para el desarrollo de este proyecto fue de gran importancia el conocimiento en tres (3) áreas de ingeniería Mecánica, el conocimiento en materiales polímeros, procesos de inyección de los polímeros, y mecanizado de metales, una vez relacionadas estas temáticas de ingeniería, y la definición de las normas para las cuales se realizará un espécimen en proceso de inyección, se da el punto de arranque de la ingeniería conceptual para el diseño del molde.
2. Con la ingeniería básica del molde, donde se realizaron los cálculos de cantidad de cavidades del molde, donde se definió que el molde es multipropósitos para la inyección de cuatro (4) especímenes, donde las placas de los especímenes deben ser intercambiables y deben conservar la misma geometría dimensional para el cambio de placas. Se concluye que las placas de los especímenes deben llevar dos cavidades por cada placa, aun cuando para el espécimen de la norma ASTM D- 638 Tipo 1 el cálculo por fuerza de cierre de la maquina estuvo por debajo en 21.5%, pero el cálculo por capacidad de inyección de la misma maquina estuvo por encima en un 350% de lo requerido.
3. Los cálculos y la selección de los componentes del molde son el punto de inicio para el diseño final del molde, donde el cálculo de mayor importancia es el de el espesor de pared de la placa de los especímenes, la cual es la de mayor complejidad de obtención por la cantidad de componentes que lleva, y con los datos de los especímenes de inyección tales como peso, área y volumen se realiza la selección de los componentes de la misma placa, tales como bebedero, mazarota, canales de distribución, punto de inyección, etc.

Fase 2: Diseño Final del Molde.

4. Con el uso de las herramientas CAD, CAE Y CAM se realiza el diseño final del molde, donde en primera instancia la modelación de los especímenes y componentes del molde es necesario, y a partir de cada uno de los análisis CAE se realizaron los ajustes necesarios para determinar el diseño final. El

primer ajuste son las dimensiones con respecto a los resultados obtenidos con el software Mold Flow Adviser, donde establece parámetros de inyección de la máquina y ajustes dimensionales del espécimen. El segundo ajuste es indicado por el análisis de elementos finitos donde indica cuales son los posibles fallos en la pieza de acuerdo con las condiciones máximas de operación de la máquina, en este análisis se refleja que el molde puede trabajar con el 10% de la fuerza de cierre de la prensa (4,5 toneladas) y con una presión de inyección de 120 MPa.

5. Al realizar los cálculos básicos de inyección (tiempo de inyección, tiempo de solidificación y tiempo total) y seguido se realiza la comparación los resultados obtenidos por el software Mold Flow Adviser. Se concluye que los cálculos son los que proyectan el proceso de inyección del molde, y que el resultado obtenido con el uso del software es más acertado, aunque la diferencia entre los cálculos convencionales y los resultados obtenidos no tienen una discrepancia grande y son acordes.

### Fase 3: fabricación del molde

6. En el proceso de mecanizado del molde se tomaron en cuenta las recomendaciones de las posibles fallas de acuerdo con el análisis de elementos finitos realizado al molde, las modificaciones pertinentes, tales como la eliminación de concentradores de esfuerzos en los agujeros de las cabezas de los tornillos, que son los puntos críticos de la construcción del molde.
7. En la fabricación del molde fueron empleadas máquinas herramientas convencionales y máquinas CNC (centro de mecanizado). El centro de mecanizado es una máquina herramienta, con la cual se garantiza una gran precisión dimensional de los acabados de la pieza, donde el factor humano con la interacción con la máquina no requiere de la experticia del operador para conseguir la precisión dimensional, es decir, que un operador de máquinas herramientas con una experiencia mínima puede realizar el trabajo y garantizar la precisión dimensional de acuerdo con los parámetros de tolerancias establecidas en los modelos simulados con el software Master Cam X2.
8. Los tratamientos térmicos realizados a las placas de las cavidades de los especímenes son realizados según las especificaciones de la ficha técnica del material, esto con fin de aumentar la dureza del material y mejorar su resistencia y durabilidad.
9. La hoja de procesos es la guía para la obtención de una pieza por diferentes procesos de mecanizado, con esta hoja se establece la secuencia lógica para

ejecutar los mecanizados respectivos de la placa, teniendo en cuenta los parámetros finales establecidos de la pieza, tales como dimensiones, acabado superficial y dureza.

#### Fase 4. Ajuste de molde.

10. Una vez obtenidas todas las piezas que componen del molde, se realiza el ensamble de los componentes, la placa fija y la placa móvil, estos dos (2) componentes forman el molde total, los ajustes realizados para el deslizamiento y facilidad de operación, son trabajos manuales hechos en banco de trabajo por personal calificado para realizar las operaciones, estos procesos son necesarios para el ajuste mecánico del molde y su funcionamiento en la máquina.
11. Montaje del molde en la inyectora, esta actividad debe ser realizada por personal capacitado y con la herramienta adecuada para el levantamiento del molde, el riesgo de peligro en el montaje del molde es alto, debido a la posición que debe quedar el molde y la forma adecuada en que se debe realizar, contemplando todas las medidas de seguridad propias de esta operación. Como son el izaje del molde, la manipulación de la máquina, y el ajuste del molde dentro de la máquina. Y para realizar pruebas de funcionamiento es necesario el acompañamiento de los docentes y del personal encargado del laboratorio de inyección de plásticos de la Universidad ECCI.

#### Fase 5. Puesta a punto y pruebas de funcionamiento

12. Basados en los resultados obtenidos con el software Mold Flow Adviser, se establecen los parámetros iniciales de operación y ajuste de la máquina de inyección, donde se encuentran parámetros de presión de inyección, temperatura del molde, temperatura de la masa fundida. Estos parámetros de calibración de máquina son muy aproximados, donde es necesario establecer modificaciones de acuerdo con cada proceso de inyección de cada espécimen de las diferentes normas establecidas, es decir que los parámetros de inyección son con los que inicialmente se realizan las calibraciones de la máquina, pero de ser necesario modificar los parámetros iniciales se debe realizar y ajustar para que las probetas inyectadas de los especímenes cumplan con las condiciones necesarias de inyección.

## RECOMENDACIONES.

1. Se requiere que este molde trabaje bajo las especificaciones de taraje dadas bajo los resultados obtenidos en la Tabla 12.
2. Es necesario que en las operaciones de inyección de este molde haya refrigeración, ya que en las pruebas realizadas no fue posible tener este equipo a disposición y es necesario para cumplir con las especificaciones de inyección.
3. El uso de las herramientas CAD / CAM y CAE, son de gran importancia para el desarrollo de proyectos, el uso de los modelos virtuales arrojados por los software CAD (Auto desk Inventor) proyectan el resultado final de obtención, y son la base para el desarrollo del proyecto, el Software CAE, donde se realizan las simulaciones de procesos (Moldflow Adviser) es donde se proyectan las condiciones de operación, donde se establecen los parámetros iniciales de operación y el resultado de esta simulación es la primera parte de I

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. de desarrollo tecnologico- ASTIN, *Inyección De Plásticos*, no. 1. 2005.
- [2] T. S. Gustavo, *1 Capítulo 1- Curso Polímeros*. 2005.
- [3] J. FRED W. BILLMEYER, "Ciencia de los Polimeros." EDITORIAL REVERTE, SA., BARCELONA, 1975.
- [4] J. William d. callister, "introduccion a la Ciencia e ingeniería de los materiales." p. 1003, 2004.
- [5] O. Rojas, "Fundamentos de reología," *Cuad. FIRP S521-C Módulo enseñanza en Fenom. interfaciales*, pp. 40–43, 2012.
- [6] R. Navarro, M. Pérez Perrino, M. Gómez Tardajos, and H. Reinecke, "Phthalate Plasticizers Covalently Bound to PVC: Plasticization with Suppressed Migration," *Macromolecules*, vol. 43, no. 5, pp. 2377–2381, Mar. 2010.
- [7] <http://www.malvern.com/es/products/technology/rheometry-rotational/>, "Reometría - rotacional."
- [8] [www.ictsl.net](http://www.ictsl.net), "Viscosímetro rotacional."
- [9] colaboradores de Wikipedia and [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%8Dndice\\_de\\_fluidez&oldid=91684138](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%8Dndice_de_fluidez&oldid=91684138), "Índice de fluidez."
- [10] colaboradores de Wikipedia. <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Pol%C3%ADmero&oldid=91573158>, "Polímero," 2016.
- [11] [Http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.co/2011/06/inyeccion-de-materiales-plasticos-i.html](http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.co/2011/06/inyeccion-de-materiales-plasticos-i.html), "Ciclo de inyeccion 1," 2011.
- [12] P. M. The American Society for Testing and Materials, *Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of*, vol. 08, no. June. 2002.
- [13] Astm, "ASTM D638: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics," *ASTM Stand.*, no. January, pp. 1–15, 2004.
- [14] A. International, "Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulation Materials," *ASTM Stand.*, 2003.
- [15] ASTM standard, "Standard Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimen by Means of a Striker Impacted by a Falling Weight (Gardner Impact).," *ASTM Int.*, vol. i, no. Reapproved, pp. 1–8, 1996.
- [16] E. J. P. Mark E. Coticchia, George W. Crawford, "CAD/CAM/CAE SYSTEM." Edward J. Preston2, illustrated, revised CRC Press, 1993.
- [17] Instituto de Capacitacion e Investigacion del Plastico y del Caucho, "ENTRADAS DE ALIMENTACION A Dos casos básicos," 2004.
- [18] PlasticsEurope, "Plastics - the facts 2014/2015: Ananalysis of European plastics production, demand and waste data," *PlasticsEurope*, pp. 1–34, 2015.
- [19] D. R. Tobergte and S. Curtis, "Chemical Information and Modeling," *J. Chem.*

*Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.

- [20] F. Blanco, “Tema 11: Moldeo por inyección,” *Univ. Oviedo*, 2016.
- [21] G. Gili, “diagrama para determinar la amplitud del diámetro del canal de entrada sistema de bebederos puntiforme, en relación con el peso de la pieza.  $G$  = peso de la pieza en gramos.  $\varnothing\text{-D2}$  = diámetro del canal puntiforme de entrada en mm.” 1975.
- [22] J. de juanes Marquez sevillano, “Análisis térmico de la inyección Interés del control de temperatura del molde.”